

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Igor Blažinić**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentori:

Izv.prof. dr. sc. Dražen Lončar

Student:

Igor Blažinić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Draženu Lončaru na savjetima pri izradi diplomskog rada, razumijevanju pri izradi kao i pri pomoći u odabiru zadatka, te odabiru problematike koja se javlja u ORC kogeneracijskim postrojenjima loženim biomasom.

Zahvaljujem se inženjeru drvne tehnologije i energetsom savjetniku Željku Lovraku na ukazanim problemima koji se često javljaju u praksi kod ovakvih postrojenja. Projektantski savjeti, primjeri iz prakse, europsko tržište te konfiguracije i tehnološki parametri samo su neki od savjeta. Svojom energijom, željom za napretkom i bezrezervnoj pomoći motivirao me, i na tome sam mu beskrajno zahvalan.

Zahvaljujem se svim svojim kolegama, prijateljima i obitelji, a posebno baki Ani i djedu Ivanu koji su vjerovali u mene i ovim putem im se zahvaljujem na pruženoj podršci i pomoći.

Također, zahvaljujem se i onima koji su sumnjali u moju energiju, sposobnosti te se i njima ovim putem zahvaljujem, jer su me motivirali čak i više nego svi ostali zajedno.

Naposlijetku posvetio bih ovaj rad najzaslužnijoj osobi. To je produhovljena, plemenita, energična i nadasve neiskvarena osoba. Mama hvala ti za sve što si napravila za mene – ovo je tek početak. *Mojoj majci Nataliji*

Igor Blažinić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Igor BLAŽINIĆ**

Mat. br.: 0035168825

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **300 kW ORC KOGENERACIJA NA DRVNU SJEČKU**

Naslov rada na engleskom jeziku: **300 kW ORC COGENERATION FIRED BY WOOD CHIPS**

Opis zadatka:

Zahvaljujući dostignutom stupnju razvoja tehnološke opreme, ali i poticajnom regulatornom okviru koji je na snazi u Republici Hrvatskoj, pogon kogeneracijskih postrojenja manjih snaga predstavlja energetski i troškovno učinkovit način zbrinjavanja drvnog ostatka nastalog u procesu prerade u drvnoj industriji. U segmentu snaga do 500 kW trenutno dominiraju konfiguracije koje se temelje na izgaranju biomase i korištenju topline u organskom Rankineovom ciklusu (ORC).

U okviru rada potrebno je:

1. Usporediti značajke tehnologija koje se temelje na izgaranju i na rasplinjavanju biomase u segmentu postrojenja čija električna snaga ne prelazi 500 kW.
2. Definirati konfiguraciju i tehnološke parametre ORC kogeneracijskog postrojenja s termouljnim kotlom, električne snage 300 kW i toplinske snage 1200 kW.
3. Za termouljni krug dimenzionirati glavne izmjenjivačke površine i izvesti matematički model dinamike termohidrauličkih procesa.
4. Simulirati pogon postrojenja u uvjetima promjene toplinskog opterećenja.
5. Nacrtati položaj glavnih komponenti postrojenja i razvod instalacije termoulja.

U tekstu diplomskog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

7. svibnja 2015.

9. srpnja 2015.

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Dražen Lončar

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY .....	X
1. UVOD.....	1
1.1. Legislativa.....	2
2. ORC (Izgaranje).....	4
2.1. Termo ulje .....	14
2.2. Radne tvari .....	17
3. PLINSKI MOTORI (Rasplinjavanje).....	19
4. KONFIGURACIJA ORC MODULA .....	26
4.1. Izbor radne tvari .....	26
4.2. Proračun ORC modula .....	28
4.3. Turbina .....	30
4.4. Pumpa.....	32
4.5. Regenerator .....	33
4.6. Isparivač .....	35
4.7. Kondenzator .....	37
5. ODABIR LOŽIŠTA .....	39
5.1. Termodinamički proračun izgaranja .....	39
6. KOTAO UTILIZATOR.....	47
6.1. Toplinski proračun .....	48
7. MATEMATIČKI MODEL TERMOHIDRAULIČKIH PROCESA.....	56
7.1. Pojednostavljenje i opis matematičkog modela .....	56
7.2. Diferencijalne jednačbe.....	57
7.3. Stacionarno stanje .....	58
7.4. Odzivi naglih promjena.....	59
7.4.1. Povećanje ulazne temperature dimnih plinova .....	60
7.4.2. Povećanje ulazne temperature termo ulja .....	61
7.4.3. Povećanje protoka termo ulja.....	62
7.4.4. Povećanje protoka dimnih plinova.....	63

8. POGON POSTROJENJA U IZVANPROJEKTNIM UVJETIMA.....	64
8.1. Postrojenje koje pokriva toplinske potrebe lokacije .....	66
8.2. Postrojenje koje proizvodi viškove toplinske energije .....	68
9. ZAKLJUČAK.....	70
LITERATURA.....	71
PRILOZI.....	73
PRILOG 1 Glavne komponente postrojenja.....	1
PRILOG 2 Kod u MATLABU.....	10

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Tržišni status i raspon primjene različitih tehnologija korištenja biomase .....	4
Slika 2.	Suvremeni kotao na biomasu s izgaranjem na nagnutoj rešetki [6] .....	7
Slika 3.	Postrojenje u kojem se upotrebljava fluidizirani sloj kao tehnika izgranja [24] .....	8
Slika 4.	Presjek ložišta s izgaranjem u fluidiziranom sloju: mjehurićasti (lijevo) i cirkulirajući (desno) [6] .....	9
Slika 5.	Osnovne komponente ORC procesa s prikazom u T, s dijagramu [4] .....	10
Slika 6.	Konfiguracija ORC postrojenja [6] .....	13
Slika 7.	ORC modul sa osnovnim dijelovima [19] .....	13
Slika 8.	Temperatura isparavanja prema tlaku za Downtherm Q [2] .....	16
Slika 9.	Mokri, izentropski i suhi radni fluidi [3] .....	17
Slika 10.	Shema protustrujnog reaktora i faze rasplinjavanja [6] .....	20
Slika 11.	Putevi rasplinjavanja biomase [20] .....	20
Slika 12.	Shema postrojenja temeljenog na rasplinjavanju biomase [7] .....	22
Slika 13.	Shema pročišćavanja generatorskog plina [9] .....	23
Slika 14.	Plinski motor [25] .....	24
Slika 15.	Usporedba značajki radnih tvari .....	27
Slika 16.	Funkcionalna shema ORC modula .....	29
Slika 17.	Prikaz ORC procesa u T, s dijagramu .....	29
Slika 18.	Izentropska iskoristivost turbine u T, s dijagramu [4] .....	30
Slika 19.	Izentropska iskoristivost pumpe u T, s dijagramu [4] .....	32
Slika 20.	Funkcionalni prikaz regeneratora [4] .....	33
Slika 21.	Prikaz izmjene topline u regeneratorskom .....	34
Slika 22.	Funkcionalni prikaz isparivača .....	35
Slika 23.	Prikaz prijenosa topline u isparivaču .....	36
Slika 24.	Funkcionalni prikaz kondenzatora .....	38
Slika 25.	Prikaz prijenosa topline u kondenzatoru .....	38
Slika 26.	Kataloški prikaz ložišta [1] .....	45
Slika 27.	Skica izmjenjivačkih površina kotla utilizatora .....	47
Slika 28.	Utjecaj udaljenosti cijevnih zmija na koeficijent prijelaza topline [18] .....	53
Slika 29.	Utjecaj promjera cijevi na koeficijent prijelaza topline [18] .....	54
Slika 30.	Modelna shema utilizatora sa kontrolnim volumenima .....	56
Slika 31.	Prikaz temperatura u stacionarnom stanju .....	58

Slika 32.	Stacionarne temperature dimnih plinova i termo ulja .....	59
Slika 33.	Odzivi na poremećaj ulazne temperature dimnih plinova.....	60
Slika 34.	Odzivi na poremećaj ulazne temperature termo ulja .....	61
Slika 35.	Odzivi na poremećaj protoka termo ulja .....	62
Slika 36.	Odzivi na poremećaj protoka dimnih plinova .....	63
Slika 37.	Godišnji toplinski zahtjevi.....	65
Slika 38.	Linearni odnos proizvedene električne i toplinske snage.....	66
Slika 39.	Godišnja proizvodnja električne snage.....	66
Slika 40.	Godišnja potreba toplinske energije u isparivaču.....	67
Slika 41.	Evakuirana toplinska energija .....	68
Slika 42.	Godišnja proizvodnja električne energije.....	69



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Elektrane na biomasu podjeljenje po snazi [11].....	3
Tablica 2. Rad kogeneracijskih postrojenja na biomasu [11] .....	3
Tablica 3. Parametri odabranog termo ulja .....	16
Tablica 4. Usporedba ORC i plinskog motora manjih snaga .....	25
Tablica 5. Vrijednosti proračuna željene snage na turbini sa nekoliko radnih tvari .....	27
Tablica 6. Pogonski parametri turbine .....	31
Tablica 7. Pogonski parametri pumpe .....	32
Tablica 8. Parametri regeneratora .....	34
Tablica 9. Parametri isparivača .....	36
Tablica 10. Parametri kondenzatora .....	37
Tablica 11. Sastav drvene sječke .....	39
Tablica 12. Molni sastav goriva .....	40
Tablica 13. Mase, množine i volumeni dimnih plinova .....	42
Tablica 14. Molni i maseni udjeli dimnih plinova .....	43
Tablica 15. Kataloška tablica mjera ložišta [1] .....	44
Tablica 16. Dimenzije ložišta [1] .....	45
Tablica 17. Rezultati proračuna drugog prolaza dimnih plinova .....	54
Tablica 18. Rezultati proračuna trećeg prolaza dimnih plinova.....	55
Tablica 19. Rezultati simulacije postrojenja bez kondenzatora .....	67
Tablica 20. Rezultati simulacije postrojenja sa zračnim hladnjakom .....	69

---

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

- 1 Razvod instalacije termoulja
- 2 Funkcionalna shema postrojenja

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$\eta_k$	-	Godišnja učinkovitost postrojenja
$\eta_e$	-	Godišnja električna učinkovitost postrojenja
$E_k$	MWh	Električna energija proizvedena u kogeneraciji
$Q_f$	MJ	Godišnja potrošnja primarne energije
$H_k$	kW	Korisna toplota
$C_k$	-	Korekcija poticajne cijene
$C$	-	Visina poticajne cijene
$k$	-	Korektivni koeficijent
$\eta_R$	-	Rankinov stupanj djelovanja
$T_{od}$	K	Srednja temperatura odvođenja topline
$T_{md}$	K	Srednja temperatura dovođenja topline
$\eta_{plina}$	-	Stupanj učinkovitosti pretvorbe
$\eta_G$	-	Električna iskoristivost generatora
$\eta_T$	-	Izentropska iskoristivost turbine
$h$	kJ/kg	Specifična entalpija
$m_{rt}$	kg/s	Protok radne tvari
$P_t$	kW	Snaga turbine
$P_n$	kW	Neto snaga predana u mrežu
$P_{potr}$	kW	Snaga potrebna za podmirivanje vlastitih potreba
$T$	K	Temperatura
$S$	kJ/kgK	Specifična entropija
$P_p$	kW	Snaga pumpe
$\eta_P$	-	Iskoristivost pumpe
$Q_{pp}$	kW	Toplinski tok pregrijane pare
$Q_{vk}$	kW	Toplinski tok vrele kapljevine
$k$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent prolaza topline
$A$	m <sup>2</sup>	Površina
$\Delta T_m$	K	Srednja logaritamska temperatura
$D_v$	m	Vanjski promjer cijevi
$D_u$	m	Unutarnji promjer cijevi
$\lambda$	W/mK	Toplinska provodnost
$\alpha$	W/m <sup>2</sup> K	Koeficijent prijelaza topline
$Q_{reg}$	kW	Toplinski tok izmjenjen u regeneratorsu
$Q_{isp}$	kW	Toplinski tok isparivača
$Q_{tu}$	kW	Toplinski tok termo ulja
$Q_{kond}$	kW	Toplinski tok izmjenjen u kondenzatoru
$Q_{rv}$	kW	Toplinski tok rashladne vode

$\Delta h_d$	kJ/kg	Donja ogrjevna vrijednost
$n$	mol	Množina
$M$	g/mol	Molarna masa, masa
$O_{min}$	kmol/kg	Molni udio kisika za izgaranje
$O_{MIN}$	kg/kg	Maseni udio kisika za izgaranje
$v_{omin}$	$m_n^3/kg$	Volumenski udio kisika za izgaranje
$L_{min}$	kmol/kg	Molni udio zraka za izgaranje
$L_{MIN}$	kg/kg	Maseni udio zraka za izgaranje
$v_{Lmin}$	$m_n^3/kg$	Volumenski udio zraka za izgaranje
$m$	kg	Masa
$\lambda$	-	Pretičak zraka
$x$	-	Maseni udio
$y$	-	Molni udio
$q_{mg}$	kg/s	Maseni protok goriva
$q_{ng}$	kmol/s	Molarni protok goriva
$c$	kJ/kgK	Specifični toplinski kapacitet
$t_{dpt}$	°C	Teoretska temperatura izgaranja dimnih plinova
$\varepsilon$	-	Emisijski faktor
$\omega$	-	Geometrijski faktor smještaja
$C_c$	$W/m^2K^4$	Univerzalna konstanta zračenja
$q_{zr}$	$W/m^2$	Gustoća toplinskog toka
$p$	Pa	Tlak
$\vartheta$	°C	Temperatura
$\rho$	$kg/m^3$	Gustoća
$\mu$	Pa s	Dinamička viskoznost
$R$		Plinska konstanta
$w$	m/s	Brzina
$Re$	-	Reynoldsov broj
$Pr$	-	Prandtllov broj
$f_0$	-	Faktor tangencijalnog odvođenja topline u stijenci
$f_1$	-	Faktor zakrivljenja cijevi i toplinskog toka
$D_h$	m	Hidraulički promjer
$\varphi$	-	Parametar cijevne zmije
$K$	$W/m^2K$	Koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu
$C$		Konstante u proračunu dinamike termohidrauličkih procesa
$P_{naz}$	kW <sub>e</sub>	Nazivna električna snaga kogenereacije
$Q_{naz}$	kW <sub>t</sub>	Nazivna toplinska snaga kogeneracije
$P_{en}$	MW <sub>he</sub>	Električna energija kogeneracije
$Q_{en}$	MW <sub>ht</sub>	Toplinska energija kogeneracije
$P_{mr}$	MW <sub>he</sub>	Električna energija predana u mrežu
$B_{dr}$	kg	Potrošnja drvnog ostatka

---

**SAŽETAK**

U prvom dijelu rada uspoređene su značajke tehnologija, koje se temelje na izgaranju i rasplinjavanju biomase. U praktičnom dijelu rada definirana je konfiguracija ORC kogeneracijskog postrojenja sa svojim tehnološkim parametrima. Prema ORC modulu izabrano je ložište, te kotao utilizator koji osiguravaju nazivnu toplinsku snagu za ORC modul. Izveden je matematički model dinamike termohidrauličkih procesa u termouljnom kotlu radi praćenja pregrijanja termo ulja, kao i radi promjene opterećenja termouljnog kotla. Odabrana je konfiguracija kogeneracijskog postrojenja sa zračnim kondenzatorom nakon analize dva slučaja. U prilogu je opisan rad postrojenja sa osnovnim komponentama kao i kotlovnica sa osnovnim dijelovima. Izrađeni su tehnički crteži razvoda termo ulja u kotlovnici te funkcionalna shema postrojenja.

Ključne riječi: ORC, organski Rankine-ov ciklus, rasplinjavanje biomase, termouljni kotao, dinamika procesa,

---

**SUMMARY**

In the first part of this thesis, comparison between technologies that use combustion and gasification of biomass has been made. In the practical part of thesis configuration of ORC power plant is chosen and all technological parameters have been calculated. Furnace and heat recovery boiler have been scaled according to ORC modul. Mathematical model of dynamics of thermohydraulic processes has been made, to investigate thermo oil overheating and load of heat recovery boiler. After analysis of two different cases the case with the solution with air cooled condenser have been chosen. In the last part of thesis (contribution), plant operation and boiler room with main components is presented. Blueprints of thermo oil piping and functional scheme of the plant is made.

Key words: ORC, organic Rankine cycle, gasification biomass, thermo oil boiler, dynamic of processes

## **1. UVOD**

Ulaskom Republike Hrvatske u Europsku uniju prihvaćen je nametnuti strateški plan razvoja, među kojima je i energetska razvoj. Budući da je glavni energetska cilj Europe već dosada jako poznati „20-20-20“, država je odlučila poticajnim regulatornim okvirom ubrzati put ka cilju. Drvna industrija su prepoznale obnovljivi izvor energije te se okrenule energetska i troškovno učinkovitijem načinu zbrinjavanju drvnog ostatka nastalog u procesu prerade u drvnj industriji. Osnovna ideja projekata je proizvodnja električne energije kroz status povlaštenog proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora te iskorištavanje toplinske energije kao nusprodukt proizvedene električne energije. Toplinska energija se može koristiti za grijanje vlastite lokacije, sušenje drvnog ostatka kao dio proizvodnog procesa peleta ili prodaju toplinske energije javnim ustanovama. Iako je regulatorni okvir za povlaštene proizvođače električne energije iz obnovljivih izvora energije već na snazi od 2007., u Hrvatskoj je tek na desetak postrojenja u funkciji. U skorijoj budućnosti očekuje se velika ekspanzija kogeneracijskih postrojenja na biomasu na području Republike Hrvatske, kao i u cijeloj jugoistočnoj Europi. Projektiranje postrojenja ponajprije ovisi o raspoloživom drvnom ostatku, trenutnim i budućim toplinskim potrebama lokacije. Također postrojenje mora zadovoljiti i regulatorni okvir stupnja iskorištenja kogeneracije. U radu će biti prikazane sve etape projektiranja ovakvih postrojenja.

## 1.1. Legislativa

Povlašteni proizvođač je energetska subjekt koji u pojedinačnom proizvodnom objektu istodobno proizvodi električnu i toplinsku energiju, koristi otpad ili obnovljive izvore energije na gospodarski primjeren način koji je usklađen sa zaštitom okoliša. [10]

Status povlaštenog proizvođača električne energije stiče se postizanjem minimalne ukupne godišnje učinkovitosti postrojenja  $\eta_k > 50\%$ .

Prema pravilniku o stjecanju povlaštenog proizvođača električne energije prosječna godišnja učinkovitost proizvodnje električne energije kogeneracijskog postrojenja  $\eta_e$  definirana je prema jednadžbi (1) iz pravilnika, prema [12].

$$\eta_e = \frac{3600 * E_k}{Q_f} \quad (1)$$

Ukupna godišnja energetska učinkovitost  $\eta_k$ , koja je pokazatelj učinkovitosti pretvorbe primarne energije u električnu energiju i korisnu toplinsku energiju definirana je jednadžbom (2) iz pravilnika, prema [12]:

$$\eta_k = \frac{3600 * E_k + H_k}{Q_f} \quad (2)$$

$E_k$  - električna energija proizvedena u kogeneraciji, izražava se u MWh

$Q_f$  - godišnja potrošnja primarne energije iz fosilnih goriva za pogon kogeneracijskog postrojenja, izražava se u MJ i izračunava kao suma umnožaka donje ogrjevnice vrijednosti  $H_d$  i ukupne godišnje količine goriva  $B$

$H_k$  - korisna toplina proizvedena u kogeneracijskom postrojenju u procesu kogeneracije, toplinska enegrija proizvedena u procesu kogeneracije koja se koristi u tehnološkim procesima grijanja ili sekundarnim procesima hlađenja (trigeneracija)

Prema tarifnom sustavu za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije, prema [11]:



**Isporučena električna energija** - električna energija proizvedena iz proizvodnog postrojenja koje koristi obnovljive izvore energije i kogeneracijskog postrojenja i predana u elektroenergetsku mrežu, umanjena za vlastitu potrošnju proizvodnog postrojenja te energiju pumpanja.

**Poticajna cijena** - cijena koja se plaća proizvođaču električne energije iz proizvodnog postrojenja koje koristi obnovljive izvore energije i kogeneracijskog postrojenja za vrijeme trajanja ugovora o otkupu električne energije, a iskazuje se u kn/kWh.

**Tablica 1. Elektrane na biomasu podjeljenje po snazi [11]**

Grupa proizvodnih postrojenja	C
Elektrane na biomasu instalirane snage uključivo do 300 kW	1.3
Elektrane na biomasu instalirane snage veće od 300 kW do uključivo 2000 kW	1.25
Elektrane na biomasu instalirane snage veće od 2000 kW	1.2

Za elektrane na biomasu korekcija poticajne cijene  $C_k$  određuje se za tekuću godinu prema ukupnoj godišnjoj učinkovitosti ostvarenoj u prethodnoj godini prema jednadžbi (3).

$$C_k = C * k \quad (3)$$

$C_k$  – korekcija poticajne cijene

C – visina poticajne cijene

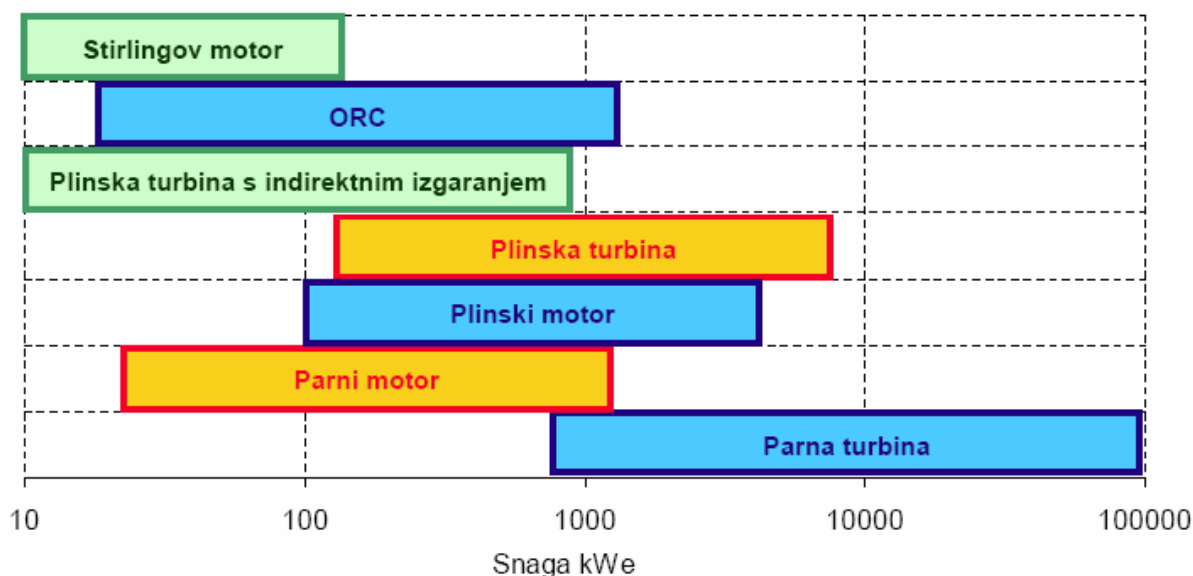
$k$  – korektivni koeficijent za postizanje ukupne godišnje učinkovitosti proizvodnog postrojenja u pretvorbi primarne energije goriva u isporučenu električnu energiju i proizvedenu korisnu toplinu

**Tablica 2. Rad kogeneracijskih postrojenja na biomasu [11]**

Rad postrojenja	k
Proizvodna postrojenja koja postignu ukupnu godišnju učinkovitost < 45%	0.9
Proizvodna postrojenja koja postignu ukupnu godišnju učinkovitost između 45% i 50%	1
Proizvodna postrojenja koja postignu ukupnu godišnju učinkovitost > 50%	1.2

## 2. ORC (Izgaranje)

Pored tehnologije primarne pretvorbe biomase (izgaranje ili rasplinjavanje) kogeneracijska postrojenja razlikuju se i prema implementiranom tehnološkom procesu. Trenutni tržišni status različitih tehnologija kao i raspon primjena s obzirom na veličinu kogeneracijskog postrojenja ilustriran je na slici 1. [6]



**Slika 1. Tržišni status i raspon primjene različitih tehnologija korištenja biomase u kogeneraciji [6]**

Za postrojenja manjih snaga prikladni su ORC i plinski motori. U sljedećim poglavljima biti će prikazane tehnologije termičke konverzije biomase (izgaranje i rasplinjavanje). ORC se temelji na izgaranju, dok rasplinjavanje proizvodi plin koji koriste plinski motori.

### Izgaranje šumske biomase [23]

Izgaranjem šumske biomase dolazi do oksidacije, spajanja gorivih tvari s kisikom, kojom se oslobađa pohranjena kemijska energija u obliku toplinske energije. Kemijska energija u šumskoj biomasi potječe od Sunčeve energije. Cilj izgaranja šumske biomase je ostvariti što učinkovitije izgaranje te iz pohranjene kemijske energije dobiti što više toplinske energije. Proces izgaranja šumske biomase odvija se u ložištu uz prisustvo kisika, a kao produkti izgaranja javljaju se dimni plinovi i pepeo koji čine neizgoreni dijelovi. Primjenom šumske

biomase u ložištu može doći do potpunog izgaranja, tj. do potpune oksidacije kod koje svi gorivi sastojci potpuno izgore, ili do nepotpune oksidacije gdje gorivi sastojci djelomično oksidiraju. Izgaranje šumske biomase odvija se kroz šest faza:

- zagrijavanje biomase
- sušenje biomase
- pirolitička razgradnja biomase
- rasplinjavanje odvlaženih gorivih tvari
- rasplinjavanje čvrstih ugljikovih spojeva
- oksidacija zapaljivih plinova nastalih rasplinjavanjem

Prva faza odvija se na temperaturama do 100 °C. Cilj prve faze je predgrijati biomasu na temperaturu potrebnu za odvijanje ostalih faza. Druga faza, sušenje drveta odvija se na temperaturama od 100 - 150 °C u kojoj se izdvaja zaostala vlaga biomase u obliku pare. Trajanje procesa zagrijavanja i sušenja ovisi o udjelu vlage i obliku biomase, te je za manje dimenzije i manji udio vlage proces brži i obratno. Treća faza izgaranja biomase odvija se na temperaturama od 150 – 230 °C gdje se pod utjecajem topline ugljikovi spojevi razlažu na jednostavnije spojeve. Pirolitičkom razgradnjom nastaju i štetne tvari kao što je katran u tekućem stanju, ugljični monoksid i viši ugljikovodici u plinovitom stanju. Prve tri faze izgaranja biomase su endotermne, što znači da se odvijaju uz dovodenje topline izvana. Egzotermne reakcije počinju na temperaturama višim od 230 °C, gdje se iz biomase oslobađa toplina. Za zapaljenje šumske biomase vanjskim izvorom topline potrebno je postići temperaturu višu od 300 °C, dok je za samozapaljenje šumske biomase potrebna temperatura od 400 °C. Četvrta faza rasplinjavanja odvlaženih gorivnih tvari odvija se na temperaturama od 250 – 500 °C pri kojoj dolazi do termičke razgradnje gorivih tvari u kojima više nema vlage. Ova se faza najprije odvija u biomasi najbližoj izvoru zraka u ložištu koji reagira s plinovitim produktima rasplinjavanja te se oslobađa toplina koja pali čvrste i kapljive produkte pirolize, a to su katran i ugljen. U petoj fazi izgaranja biomase koja se odvija na temperaturama od 500 – 700 °C odvija se rasplinjavanje čvrstih ugljikovih spojeva. Rasplinjavanje čvrstih ugljikovih spojeva je egzotermna reakcija pri kojoj uz prisustvo ugljičnog dioksida, vodene pare i kisika nastaje zapaljivi CO. Tijekom ove faze osim topline prvi se put pojavljuje i svjetlost koja se vidi kao plamen. Šesta i posljednja faza izgaranja biomase odvija se na temperaturama od 700

-

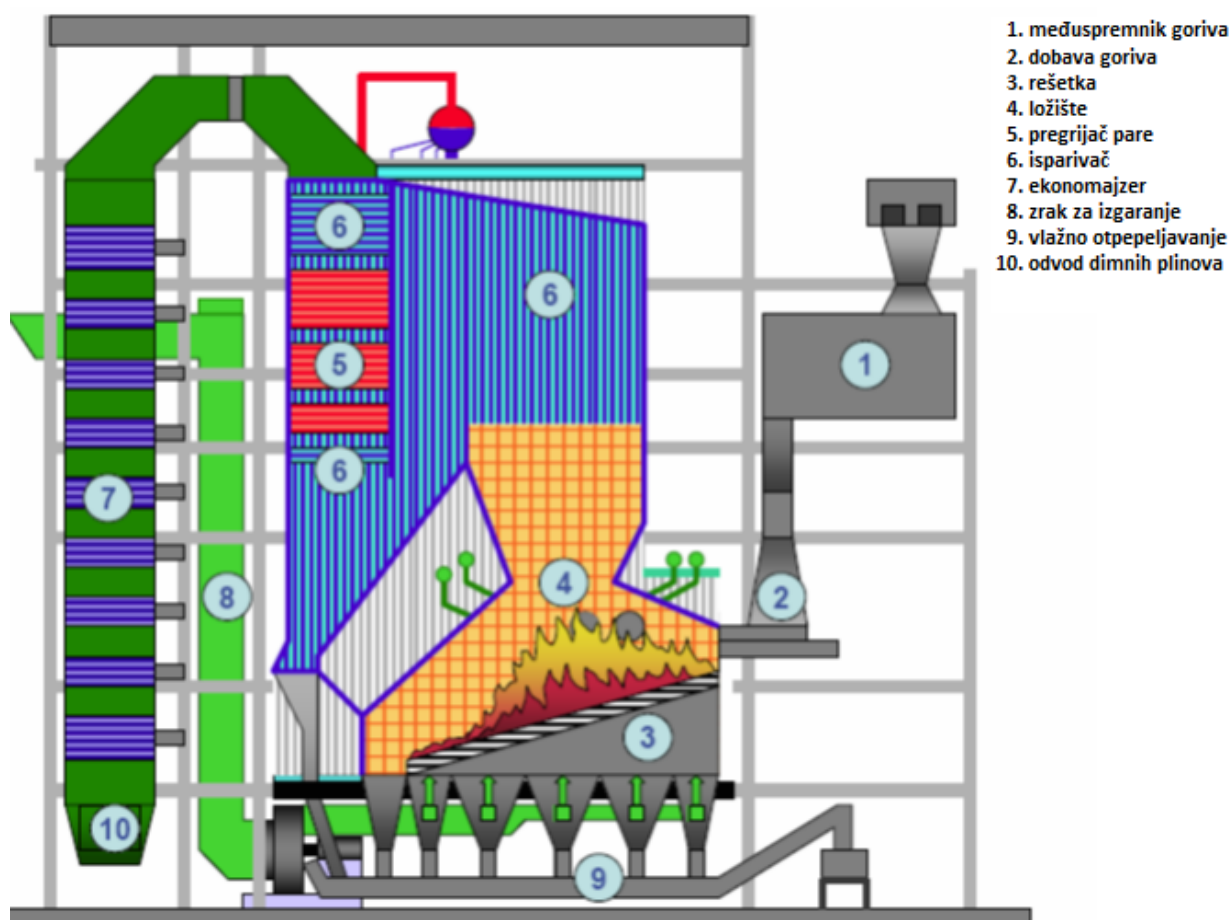
1400 °C. U njoj se odvija oksidacija zapaljivih plinova i produkata svih faza uz prisustvo zraka što je osnova za čisto i potpuno izgaranje. Tijekom šest faza postoje neke tehničke pretpostavke koje moraju biti zadovoljene. Jedna od pretpostavki je da u ložištu mora biti količina zraka veća od stehiometrijski potrebne, tj. mora postojati višak zraka. Ložište treba biti tako konstruirano da ostvaruje dobro miješanje zapaljivih plinova nastalih rasplinjavanjem i dovedenog zraka za izgaranje. Reakcijska zona ložišta mora omogućiti dovoljno dugo zadržavanje nastale smjese zapaljivih plinova nastalih rasplinjavanjem i zraka za izgaranje. Posljednja pretpostavka je da u ložištu uvijek treba biti relativno visoka temperatura. Suvremena ložišta na biomasu izvedena su tako da zadovoljavaju sve pretpostavke i omogućavaju ravnomjerno izgaranje biomase uz što manje emisije štetnih plinova. Uvjet za učinkovito izgaranje biomase u ložištu je dovod primarnog i sekundarnog zraka. Primarni zrak dovodi se u dio ložišta u kojem se nalazi biomasa i odvija njeno sušenje, zagrijavanje i razgradnja. Drugi dio zraka, koji se naziva sekundarnim zrakom, dovodi se u dio ložišta u kojem se nalaze plinovi nastali rasplinjavanjem i u kojem se odvija njihova oksidacija. Kako bi se ostvarila maksimalna učinkovitost ložišta na šumsku biomasu u svim fazama izgaranja, treba postići optimalne uvjete za odvijanje procesa, što se posebno odnosi na dovođenje primarnog i sekundarnog zraka.

## **Izgaranje na rešetci**

Ova tehnologija izgaranja je tradicionalnija tehnologija. Korištena je duži niz godina i u isto vrijeme se dosta razvila pa su neki nedostaci otklonjeni. Izgaranje se odvija u kotlu. Na kotlu je smještena rešetka na kojoj se nalaze biomasa i otpad. Sam postupak izgaranja je sličan onome kod tehnologije izgaranja u fluidiziranom sloju, razlika je samo u pripremanju biomase i otpada za samo izgaranje. Tehnologija izgaranja u rešetci je pogodnija za kruta goriva (poljoprivredni i šumarski ostaci) te za postrojenja manje snage (do 5 MW). Kontrola i regulacija izgaranja se temelje na stvaranju turbulencije što pospješuje sam proces izgaranja. To se izvršava na način da se zrak upuhuje ispod same rešetke. Nedostatak ove tehnologije izgaranja jest veća nepotpunost izgaranja nego kod tehnologije fluidiziranog sloja. Nepotpunost izgaranja sama po sebi znači gubitak određene topline. To se može dogoditi zbog nedovoljne homogenosti goriva ili zbog nedovoljne količine zraka u ložištu. Zbog toga je pri samom procesu izgaranja potrebno pronaći ravnotežu između tih parametara jer preveliki pretičak zraka znači da je izgaranje nepotpuno te da je izlazna entalpija dimnih plinova veća od poželjne. [24]

Ložišta s izgaranjem na rešetki predstavljaju razvijenu, tržišno zrelu i dugo vremena standardnu tehnologiju izgaranja biomase koja se u različitim izvedbama nalazi u ponudi brojnih

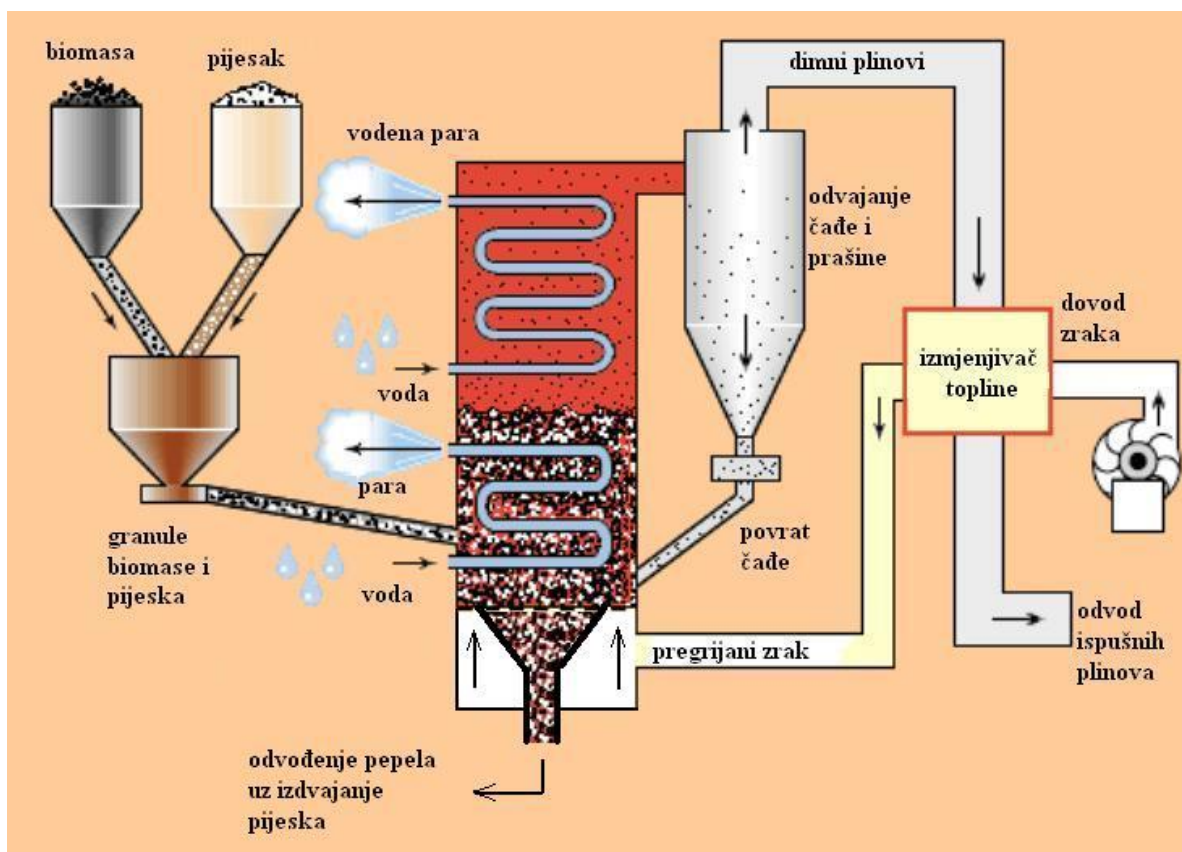
proizvođača energetske opreme. Rešetka omogućava izgaranje sječke, piljevine, krupne i komadne biomase. Prikladna je i za izgaranje vlažnih goriva, različite kvalitete, kao i goriva s visokim udjelom pepela. Kvalitetno vođenje procesa izgaranja na rešetki podrazumijeva homogenu distribuciju goriva po čitavoj površini i ravnomjerno dovodenje primarnog zraka koji se upuhuje ispod rešetke. Nehomogenosti u dovodu primarnog zraka mogu izazvati stvaranje šljake, povećati količinu letećeg pepela i povećati pretičak zraka potreban za osiguravanje potpunog izgaranja. S obzirom na način dovodenja goriva u ložište razlikuju se rešetke s donjim i rešetke s gornjim dovodom goriva. Rešetke s donjim dovodom goriva prikladne su za postrojenja manjih snaga i za izgaranje biomase koja sadrži malo pepela kao što su drvena sječka i piljevina. Biomasa koja sadrži veće količine pepela, kao što je kora drveta, slama žitarica ili trava, zahtijeva efikasniji sustav uklanjanja pepela. U ložištima s donjim dovodom goriva sinterirane ili rastaljene čestice pepela prekrivaju gorivi sloj. Kroz pokrov od pepela povremeno izbija mješavina goriva i zraka što može nepovoljno djelovati na stabilnost procesa izgaranja. [6]



Slika 2. Suvremeni kotao na biomasi s izgaranjem na nagnutoj rešetki [6]

## Izgaranja u fluidiziranom sloju

Tehnologija izgaranja u fluidiziranom sloju je naprednija i ekifasnija tehnologija izgaranja. Postoji razlika u pripremi samog goriva u odnosu na izgaranje na rešetci. Biomasa se miješa s pijeskom kojeg ima više te nastaje granulirani sloj pijeska. Taj sloj se odvodi u kotao gdje se ubacuje predgrijani zrak pod nekim tlakom. Budući da pijeska u samom sloju ima više, pod utjecajem predgrijanog zraka se granulirani sloj raspršuje po cijelom prostoru što uzrokuje turbulencije koje pospješuju kontakt goriva sa kisikom. To uzrokuje potpunije izgaranje koje iznosi oko 99 % te sveukupnu korisnost kotla koja je otprilike 90 % bez obzira na udio vlage u otpadu i jesu li komponente goriva slične kvalitete ili ne. Glavni nedostatak ove tehnologije izgaranja jest cijena koja je u odnosu na tehnologiju izgaranja na rešetci dosta veća pa se tehnologija fluidiziranog sloja koristi samo u bioelektranama snage preko 5 MW. Gledajući sveukupno, ova tehnologija izgaranja pruža veću fleksibilnost u pogledu zahtjeva na kvalitetu i vlažnost goriva. Kotlovi u kojima se koristi fluidizirani sloj mogu koristiti goriva s visokom koncentracijom pepela i niskokalorična goriva poput raznih ostataka iz poljoprivredne proizvodnje i ostataka od sječe šuma što dodatno pospješuje fleksibilnost samog tehnološkog procesa. [24]



Slika 3. Postrojenje u kojem se upotrebljava fluidizirani sloj kao tehnika izgaranja [24]

Ložišta s izgaranjem u fluidiziranom sloju razvijena su u prvom redu zbog boljeg izgaranja ugljena i s ciljem smanjenja emisija sumpornih i dušikovih oksida. S vremenom je primjena ove tehnologije proširena na biomasu kao i na druga niskoenergetska goriva koja nisu pogodna ili su nepraktična za konvencionalno izgaranje. Promjer zrnaca slikatnog pijeska obično je 1 mm dok brzina zraka fluidizacije varira između 1 i 2,5 m/s. Temperatura sloja održava se u rasponu između 800 - 900 °C posredstvom ugrađenog izmjenjivača topline kroz koji protječe pregrijana vodena para. Sekundarni zrak uvodi se kroz nekoliko ulaza smještenih u gornjem dijelu ložišta. Zrak za izgaranje upuhuje se stupnjevano što omogućuje smanjenje emisija NOx. [6]



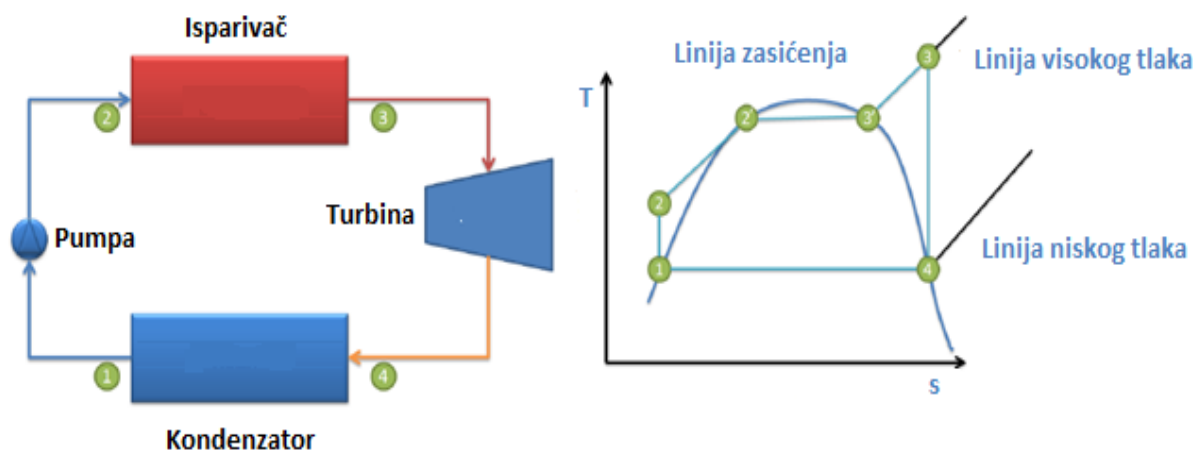
**Slika 4. Presjek ložišta s izgaranjem u fluidiziranom sloju: mjehurićasti (lijevo) i cirkulirajući (desno) [6]**

Na izbor tehnologije izgaranja utječu veličina postrojenja, značajke biomase, dopuštena razina emisije štetnih tvari, količina i opseg održavanja koje je investitor/vlasnik spreman prihvatiti. Izbor tehnologije izgaranja nema prevelik utjecaj na specifični potrošak topline u postrojenju. Na specifični potrošak topline više utječe konfiguracija parno turbinskog procesa. Suvremena postrojenja s izgaranjem uobičajeno su jeftinija od postrojenja s izgaranjem u fluidiziranom sloju. Fluidizacija sloja povećava efikasnost izgaranja ali i zahtijeva dodatnu energiju za pogon ventilatora zraka što povećava vlastitu potrošnju električne energije kogeneracijskog postrojenja. [6]



## Općenito

ORC je varijacija Rankinovog ciklusa u kojem se umjesto vode kao radnog medija koristi organski fluid. Zbog relativno niske temperature isparavanja organskog fluida moguće je iskorištavanje niskoentalpijskih izvora topline (biomasa, otpadna toplota, geotermalna i sunčeva energija). ORC tehnologija može pretvoriti toplinsku energiju relativno niskih temperatura u rasponu od 80 °C - 350 °C u električnu energiju i može igrati važnu ulogu u povećanju energetske učinkovitosti novih ili postojećih aplikacija. Prednost korištenja ORC tehnologije temelji se na činjenici da su potrebni niski radni tlakovi u odnosu na druge termodinamičke cikluse, kao što je Carnotov ili klasičan Rankinov ciklus. Također, kod ORC tehnologije izbjegava se problem korozije i erozije lopatica turbine i druge opreme postrojenja zbog karakteristika radnog fluida. Važnost ORC tehnologije posebno se može promatrati u svijetlu povećane emisije štetnih (stakleničkih) plinova nastalih uglavnom procesom sagorijevanja fosilnih goriva uzrokujući efekt staklenika, pojavu ozonskih rupa, zagađenje voda, zemlje i oštećenje šuma. U cilju smanjenja potrebno je uložiti mnogo napora za primjenu mjera u svim sektorima potrošnje te primjenu novih tehnologija sa nultom ili veoma niskom stopom emisija stakleničkih plinova. Dobrim energentom se pokazala biomasa koja zanemarivo opterećuje atmosferu s CO<sub>2</sub>, jer je količina emitiranog CO<sub>2</sub> prilikom sagorijevanja biomase jednaka količini CO<sub>2</sub> koja je neophodna za rast biljke, pod uvjetom da su sječa i prirast drvene mase u održivom odnosu. Biomasa je široko dostupna, a čine je poljoprivredni, šumski, drvni, komunalni i industrijski otpad. Toplinsku i električnu energiju dobivenu iz biomase je najbolje koristiti na lokalnoj razini jer je gustoća energije biomase mala, što povećava troškove transporta. [3]



Slika 5. Osnovne komponente ORC procesa s prikazom u T, s dijagramu [4]



Idealni Rankinov, odnosno ORC ciklus može se s osnovnim komponentama i prikazom u T, s dijagramu vidjeti na slici 5. U točki 1 nalazi se (u ovome slučaju) vrela kapljevina radne tvari temperature  $T_1$  na tlaku kondenzacije  $p_k$ . Točka 1 ne mora pasti na liniju zasićenja već „lijevo“ od nje. U tome slučaju u kondenzatoru se mora osigurati pothlađivanje. Nakon toga radna tvar u tekućem agregatnom stanju ulazi u cirkulacijsku pumpu gdje joj pumpa diže tlak na tlak isparavanja  $p_i$  i temperaturu na  $T_2$ . Nakon cirkulacijske pumpe radna tvar ulazi u isparivač gdje se odvijaju tri procesa. Prvo se radna tvar predgrijava da bi došla do stanja vrele kapljevine. Nakon predgrijavanja dolazi do isparavanja. Isparavanje završava kada sva mješavina kapljevine i pare pređe u suhozasićenu paru. Daljnjim pregrijavanjem suhozasićene pare dolazi se do točke 3 gdje je para sada pregrijana i spremna za ekspanziju u turbini. Toplinski tok za ova tri procesa osiguran je od ogrijevnog medija. Nakon izlaska iz isparivača radna tvar ulazi u turbinu i ekspandira na tlak kondenzacije  $p_k$  i temperaturu  $T_4$ . Organska para ekspandira u turbini, gdje se kinetička energija pare pretvara u mehaničku, a mehanička energija se u generatoru pretvara u električnu energiju. Nakon ekspanzije u turbini radna tvar ulazi u kondenzator gdje se, u ovom slučaju, odvija samo jedan proces. Radna tvar kondenzira i predaje toplinski tok rashladnom mediju, najčešće vodi. Ukolika točka 4 pada u pregrijano područje, radna tvar se prvo hladi u kondenzatoru (kondenzator se sastoji od kondenzatora i hladnjaka) do linije zasićenja, te kondenzira do točke 1.

## Izvedba postrojenja

U prehodnom poglavlju prikazan je osnovni Rankineov ciklus. U praksi su izvedbe postrojenja drugačije, zbog povećanja termičkog stupnja djelovanja procesa.

### Načini povećanja termičkog stupnja djelovanja

Povećanja stupnja iskoristivosti procesa:

- Povišenjem parametara svježeg pare (temperature i tlaka)
- Snižanjem temperature kondenzacije
- Regenerativnim predgrijavanjem napojne vode
- Međupregrijavanjem pare
- Regeneratorom

Prema jednadžbi (4) vidi se da termički stupanj Rankineova ciklusa utoliko raste sa povećanjem srednje temperature dovođenja topline  $T_{md}$ , odnosno ukoliko je niža srednja temperatura odvođenja topline  $T_{md}$ . [5]

$$\eta_R = 1 - \frac{T_{od}}{T_{md}} \quad (4)$$

Povišenjem parametara svježje pare raste srednja temperatura dovođenja topline, a samim time i termički stupanj djelovanja. Budući da je ogrijevni medij termo ulje koje ima temperaturni maksimum, ova mogućnost otpada. Para se pregrijava kada je tlak isparavanja nizak, a samim time i temperatura isparavanja. Ista stvar vrijedi i za međupregrijanje pare. Međupregrijanje ima još jedan nedostatak, a to je da se turbina izvodi iz visokotlačnog i niskotlačnog dijela te samim time poskupljuje investiciju.

Snžavanjem temperature kondenzacije se također podiže termički stupanj djelovanja, prema jednadžbi (4). Temperatura kondenzacije nam je određena toplinskim potrošačima, odnosno protokom i temperaturom rashladnog medija.

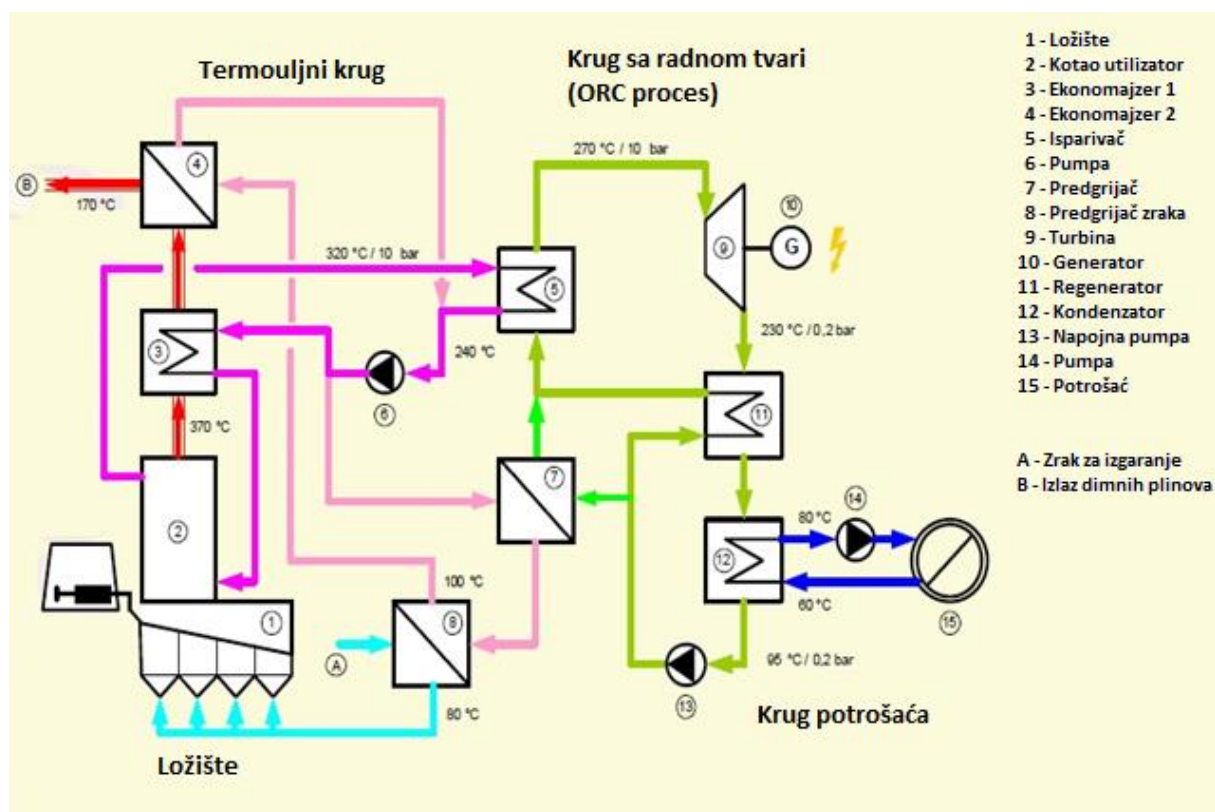
Regenerativnim predgrijavanjem radne tvari u tekućem stanju također se podiže stupanj djelovanja na račun povećanja srednje temperature dovođenja topline. Za predgrijavanje se mora osigurati turbinsko oduzimanje. Ono poskupljuje i komplicira investiciju, te se ne izvodi pogotovo kod manjih postrojenja. Neki proizvođači rade tzv. split – sustav, gdje se jedan dio stlačene radne tvari zagrijava na visoku temperaturu na račun hlađenja termo ulja.

U postrojenjima manjih snaga koristi se regenerator. Para se nakon ekspanzije u turbini uvodi u regenerator te predaje toplinu komprimiranoj radnoj tvari. Na taj način smanjuje se toplina koja se treba dovesti isparivaču, te smanjuje toplinski tok koji se mora odvesti u kondenzatoru.

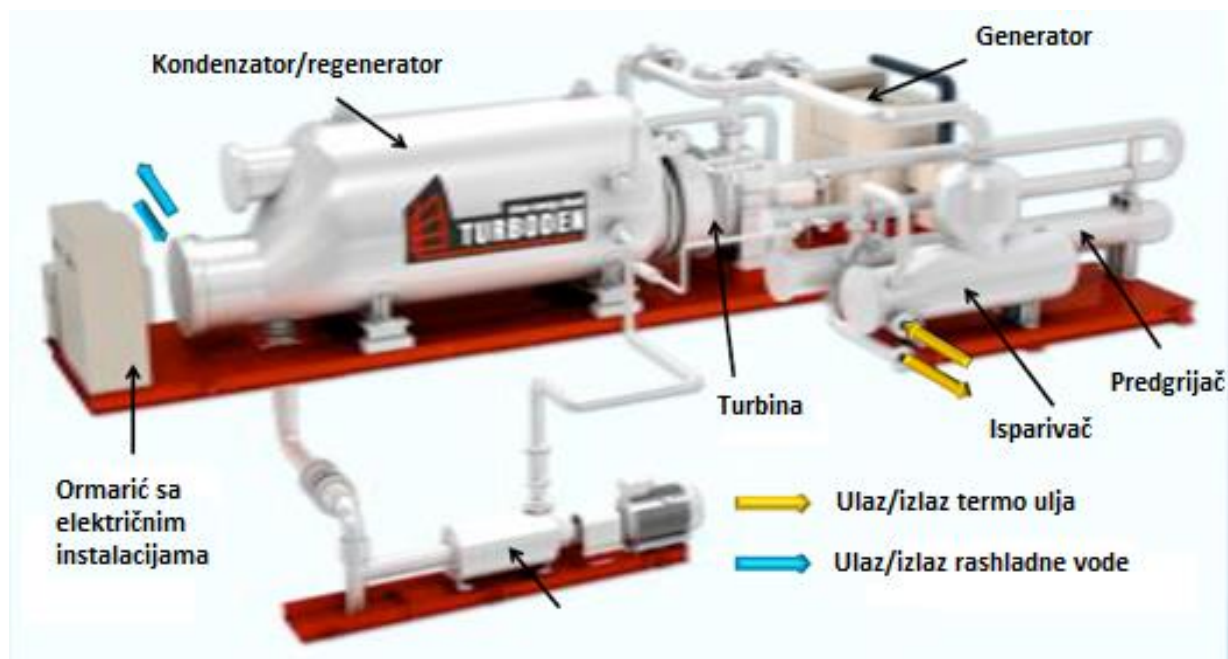
### **Konfiguracija ORC postrojenja manjih snaga**

Na slici 6. prikazana je shema ORC postrojenja. U ložištu se događa izgaranje. Dimni plinovi ulaskom u termouljni kotao zagrijavaju termo ulje na temperaturu približno oko 300 °C. Poslije kotla ulaze u prvi, pa u drugi ekonomajzer te izlaze iz drugog ekonomajzera s temperaturom oko 200 °C. Prvi ekonomajzer zagrijava termo ulje prije ulaska u kotao, dok drugi zagrijava termo ulje koje se prethodno ohladilo u predgrijaču (split – sustav) i zagrijaču zraka prije ulaska u ložište prije izgaranja. Termo ulje je transportni medij i prenosi toplinu u isparivač gdje isparuje

radnu tvar. Radna tvar expandira u turbini. Rad ORC procesa opisan je u prethodnim poglavljima. Toplina se iz kondenzatora odvodi rashladnim medijem koji je najčešće voda. Temperaturni režim rashladnog medija je najčešće 90/70 ili 80/60. Na slici 7. prikazan je ORC modul smješten u prostoru.



Slika 6. Konfiguracija ORC postrojenja [6]



Slika 7. ORC modul sa osnovnim dijelovima [19]

## 2.1. Termo ulje

Indirektni sustavi zagrijavanja u kojima se kao prijenosnik topline koristi termo ulje pruža sljedeće prednosti:

- Točka ključanja kod atmosferskog tlaka omogućuje postizanje visokih radnih temperatura: sa standardnim vrstama termo ulja mineralnog porijekla do 300 °C, dok s posebnim vrstama termo ulja do 350 °C (za iste temperature tlak zasićene vodene pare iznosi do 90, odnosno 150 bar).
- Niska temperatura staništa termo ulja (-5 °C do -30 °C) omogućava nesmetani pogon pri niskim temperaturama (puštanje u pogon iz hladnog stanja) pa čak i kod eventualnog stinjavanja (zamrzavanja) ulja ne može doći do pucanja i oštećenja dijelova instalacije (negativni dilatacioni koeficijent termičkog ulja).
- Termo ulja su slabo viskozna u vrlo širokom području temperatura i radi toga se mogu koristiti kako za grijanje, tako i za hlađenje u tehničkim procesima (naročito pogodno u procesima, gdje se istim medijem može vršiti grijanje i hlađenje).
- Termo ulja ne ostavljaju u sustavu nikakvih naslaga ili taloga niti uzrokuju koroziju materijala. U sustavu otpada priprema napojne vode, čišćenje instalacije od taloga i zaštita od korozije koji su neizbježni u klasičnim instalacijama s vodom i parom (također otpadaju problemi vezani uz kondenzat).
- Upotreba termo ulja omogućuje odličnu regulacije temperature i pruža mogućnost da se istim medijem na različitim mjestima u sustavu, postižu različite radne temperature.
- Instalacije s termo uljem, gdje je potrebna radna temperatura veća od 200 °C s obzirom da rade „bez“ tlaka (maksimalni radni tlak oko 6 bar odnosno tlak cirkulacijske pumpe potreban da se savladaju otpori) i da je isključena mogućnost eksplozije, daleko su jednostavnije i jeftinije. Zagrijači se u nekim slučajevima mogu postaviti čak i pokraj samih potrošača, a rade automatski bez stalnog nadzora osoblja.
- Instalacije s termo uljem su investicijski povoljnije i jednostavnije od odgovarajućih instalacija s vodom i parom.

Naravno da osim nabrojenih prednosti postoje i nedostaci instalacija s termo uljem:

- Termo ulja se kod prekoračenja maksimalnih dozvoljenih temperatura počinju pregrijavati i koksirati.
- U kontaktu sa zrakom pri povišenim temperaturama sklona su oksidaciji (starenju).
- Vijek trajanja im je ograničen (25 000 – 30 000 radnih sati) i potrebna je stalna kontrola kvalitete ulja.
- Specifična toplina, kao i koeficijent prijelaza topline su niži nego kod pare i vode, međutim prijelaz topline se vrši pri višim temperaturama i kompenzira taj nedostatak.
- U sustavu je neophodna prisilna cirkulacija medija pumpom.
- Djeluju agresivno na bakar i njegove legure.

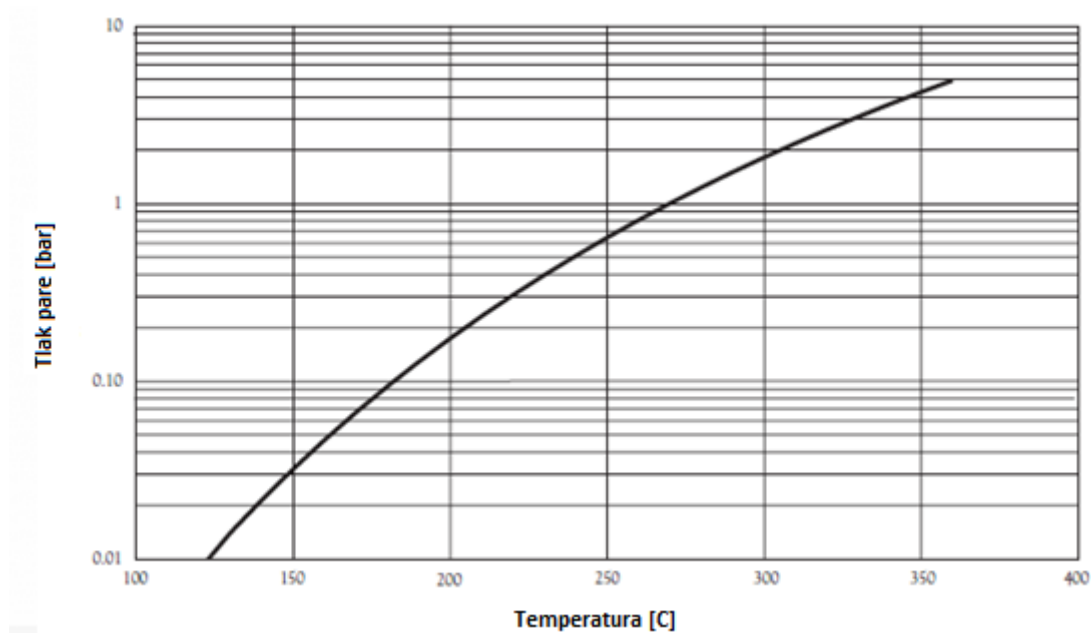
Najčešće korištena termo ulja mogu se svrstati u dvije grupe:

- Mineralnog porijekla - mješavina zasićenih ugljikovodika, dobivaju se destilacijom zemnih ulja nakon koje se dodatno obrađuju u vakuumdestilaciji i rafinaciji, upotrebljavaju se u tekućoj fazi do max. temperature cca 300 °C do 320 °C.
- Sintetičke kemijske mješavine - upotrebljava kako u tekućoj, tako i u parnoj fazi do maksimalnih temperatura od 320 °C – 400 °C.

Izbor odgovarajuće vrste termo ulja za punjenje instalacije ovisi o maksimalnoj radnoj temperaturi, izloženosti niskim vanjskim temperaturama i posebnim uvjetima, kao opasnost od požara, vrste upotrijebljenih materijala i slično.

## Downtherm Q

Za potrebe proračuna prijenosnika topline izabrano je termo ulje Dowtherm Q. Osnovni paramteri termo ulja dani su u tablici 3.



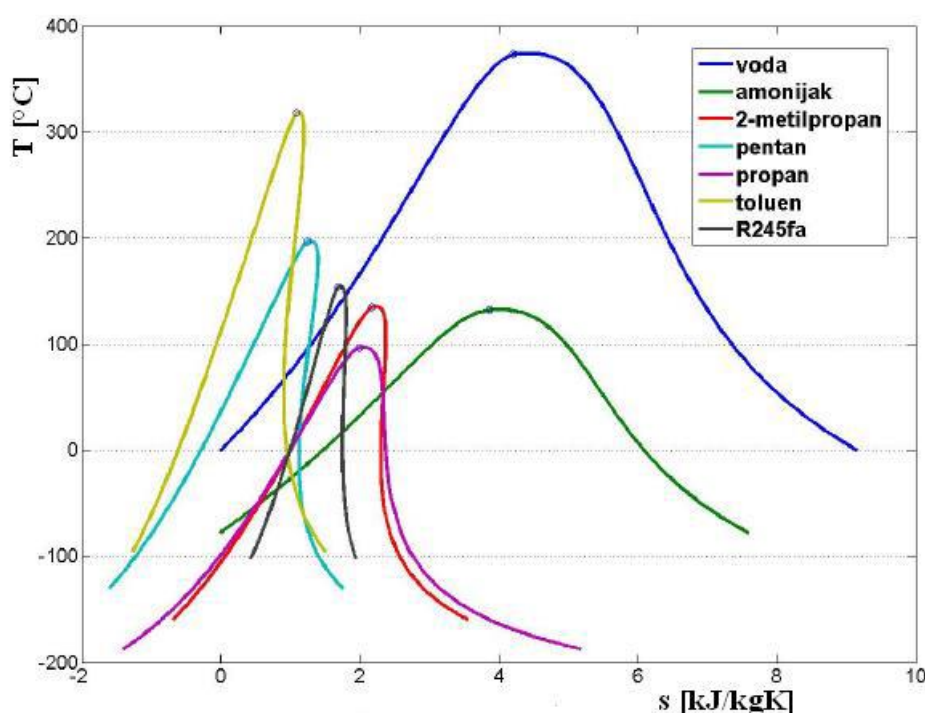
Slika 8. Temperatura isparavanja prema tlaku za Dowtherm Q [2]

Tablica 3. Parametri odabranog termo ulja

Parametar	Downtherm Q
Molarna masa	190 g/mol
Kritični tlak	24 bar
Kritična temperatura	489 °C
Raspon upotrebe	-35 do 330 °C
Maksimalna radna temperatura	360 °C
Temperatura samozapaljenja	412 K
Temperatura isparavanja na atm. tlaku	270 °C

## 2.2. Radne tvari

Klasifikacija u smislu mokrih, izentropskih i suhih može se prikazati pomoću  $T, s$  dijagrama (Sl.9). Mokri fluidi (voda, propan) imaju krivulju zasićenja pare s negativnim nagibom, izentropski fluidi imaju okomitu krivulju zasićenja pare i suhi fluidi (R245fa) imaju pozitivan nagib. [3]



Slika 9. Mokri, izentropski i suhi radni fluidi [3]

Negativan nagib krivulje zasićene pare dovodi do povećanja entropije a smanjenja temperature. Pozitivan nagib znači da sa smanjenjem entropije dolazi do smanjenja temperature, dok je kod izentropskog nagiba krivulja zasićene pare okomita (linija konstantne entropije). Izentropski i suhi radni fluidi s aspekta zaštite opreme (turbina i kondenzatora) su najpogodniji jer napuštaju turbinu kao pregrijana para i eliminiraju rizik od nastanka korozije. Međutim ako je nagib krivulje zasićene pare previše nagnut (suhi fluidi) onda para turbinu napušta sa značajnim pregrijavanjem, što može biti izgubljeno u kondenzatoru. U tom slučaju regenerator minimizira tu pojavu s predgrijavanjem radnog fluida prije ulaska u isparivač. Regenerator znači dodatnu složenost i veće investicijske troškove ORC postrojenja. Izentropski fluid napušta turbinu suh, ali bez značajnog pregrijavanja, što rezultira povećanjem učinkovitosti bez potrebe za

regeneratorom. Nadalje, gustoća organskog fluida igra ključnu ulogu pri dimenzioniranju komponenti ciklusa, koje su ovisne od volumnog protoka. Veća gustoća znači manji specifični volumen, niži volumni protok te manje dimenzije komponenata. [3]

Kriteriji koje radna tvar mora zadovoljiti su sljedeći:

- Termodinamička/eksergijska učinkovitost ciklusa ili izlazna snaga turbine trebaju biti što je moguće više za dati izvor topline i temperaturu kondenzacije radne tvari.
- Krivulja zasićenja pare (T, s dijagram) treba biti pozitivna ili izentropska. Negativne krivulje zasićenja pare (mokri fluidi) dovode do oštećenja opreme.
- Prihvatljivi tlakovi radne tvari. Visoki tlakovi u ORC procesu dovode do većih investicijskih troškova i povećanja složenosti.
- Visoka gustoća pare radne tvari. Niske gustoće dovode do vrlo velikih dimenzija turbina i kondenzatora.
- Mali utjecaj na okoliš i visok stupanj sigurnosti.
- Kemijska stabilnost na visokim temperaturama. Za razliku od vode, organski fluidi obično pate od kemijskih pogoršanja i raspadanja na visokim temperaturama. Maksimalna temperatura izvora topline je ograničena kemijskom stabilnosti radnog tvari.
- Dostupnost i niska cijena.
- Nisko ledište. Osigurava rad postrojenja pri niskim temperaturama iz hladnog starta.
- Usporedba termodinamičkih svojstava i određivanje učinkovitosti ciklusa.
- Provjera dostupnosti turbina u smislu razumnog radnog područja.



### 3. PLINSKI MOTORI (Rasplinjavanje)

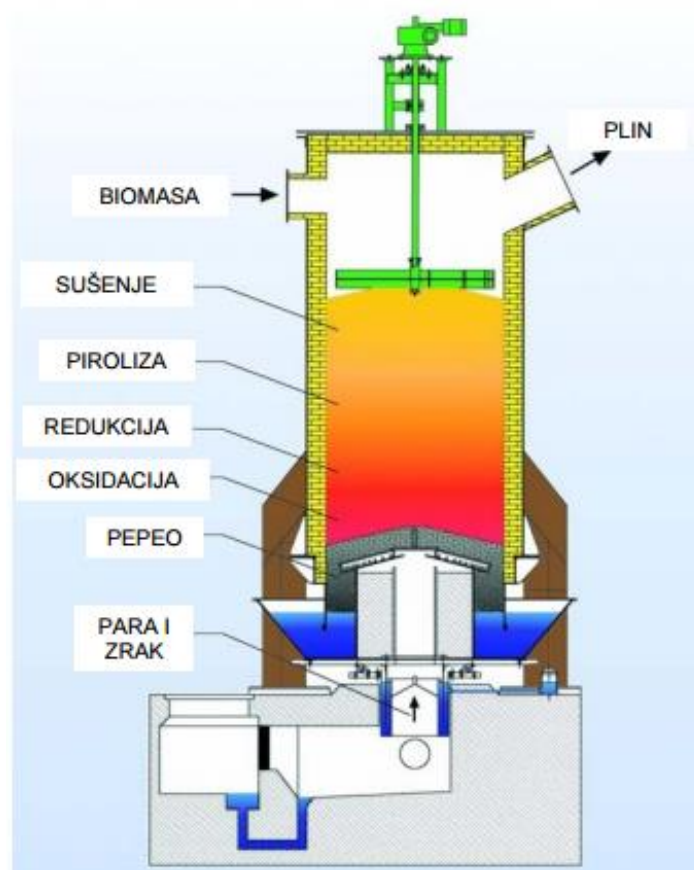
Tehnologija rasplinjavanja omogućuje postizanje ekstremnih ekoloških zahtjeva po razumnoj cijeni zbog čega se nalazi na pragu izvanrednog rasta. Pod pojmom rasplinjavanje podrazumijeva se termokemijska pretvorba organske tvari u gorivi plin. Ta se pretvorba odvija pomoću namjernog nepotpunog izgaranja prouzročenog dovođenjem kisika u količini manjoj od stehiometrijske (količina kisika potrebna za potpuno izgaranje goriva).

U kogeneracijskoj proizvodnji električne i toplinske energije iz biomase dominira tehnologija izravnog izgaranja krute biomase u ložištima termoenergetskih postrojenja. Načelno se razlikuju dva tipa izgaranja krute biomase: samostalno, u postrojenjima manje i srednje snage, te suizgaranje (suspaljivanje) s fosilnim gorivima (najčešće ugljenom) u postrojenjima srednje i velike snage. Među tehnologijama čije se značajnije korištenje u proizvodnji električne energije očekuje u budućnosti na prvom mjestu je rasplinjavanje biomase s korištenjem plina za pogon plinskih motora ili plinskih turbina. [6]

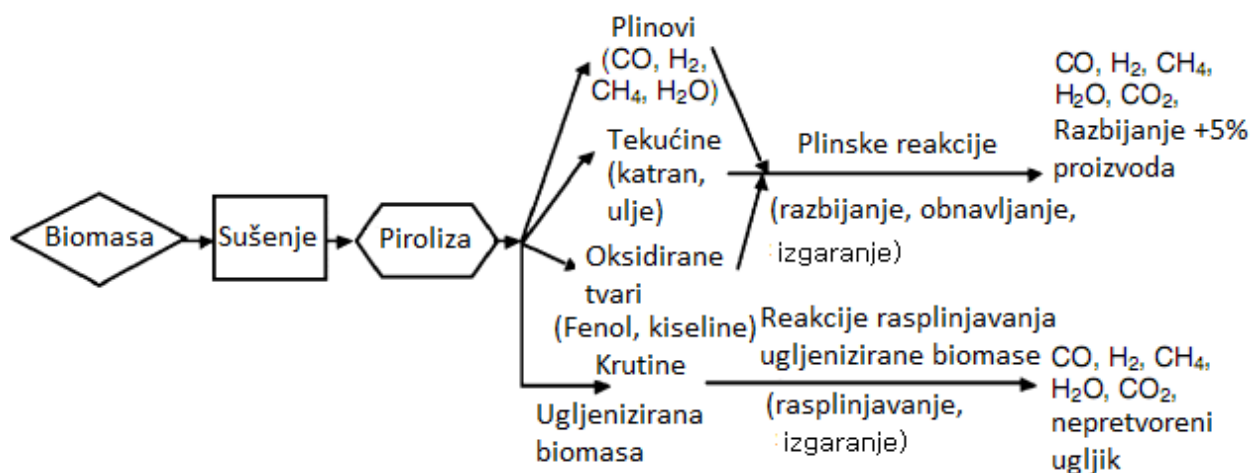
Rasplinjavanje biomase predstavlja alternativu klasičnim procesima izgaranja i proširuje mogućnosti korištenja biomase. Rasplinjavanjem se kruta biomasa transformira u gorivi ili reaktorski plin koji se može koristiti za pogon plinske turbine, plinskog motora ili gorivnih članaka u proizvodnji električne energije, ali i u procesima kemijske sinteze za proizvodnju etanola ili drugih organskih proizvoda.[6]

Prvi korak kod rasplinjavanja je zagrijavanje biomase do temperature od oko 300 °C. Budući da biomasa sadrži vlagu, njenim zagrijavanjem dolazi do isparavanja vlage, za što je potrebna značajna toplina (2500 kJ/kg). Udio vlage u biomasi može biti maksimalno 10-20%, kako se previše topline ne bi trošilo na sušenje. Nakon grijanja i sušenja dolazi do kemijske razgradnje organskih tvari pri temperaturi od 500 °C bez prisustva kisika, tzv. pirolize. Kada se postignu traženi uvjeti, dodaje se kisik zbog čijeg prisustva dolazi do izgaranja. Kisik se može dodati u 100 %-tnoj koncentraciji (čisti kisik), no zbog jednostavnijeg procesa najčešće se dovodi u ložište s atmosferskim zrakom u kojem volumna koncentracija kisika iznosi 21%. Količina dovedenog kisika je podstehiometrijska, što znači da nema dovoljno kisika kako bi sav ugljik kojeg sadrži biomasa oksidirao odnosno prešao u ugljični dioksid. Kada ponestane slobodnih molekula kisika, užareni ugljik „otima“ kisik iz ugljičnog dioksida i pare (produkata oksidacije i isparavanja) tj. dolazi do redukcije. Tim procesom nastaju ugljični monoksid i vodik, koji su gorivi plinovi, zbog čega i poželjni sastojci generatorskog plina. Dio vodika, nastao redukcijom, reagira s užarenim ugljikom što dovodi do nastanka metana, koji je također gorivi plin. Prije

izlaska iz generatora plina odvijaju se još nekoliko reakcija između plinova, od kojih su najznačajnije reakcija pare s ugljičnim monoksidom čime se dobiva vodik i ugljični dioksid, te reakcija vodika s ugljičnim monoksidom čime se dobiva metan i vodena para. Ove reakcije imaju velik utjecaj na količinu vodika i metana u generatorskom plinu, a za njihovo odvijanje je potrebna toplinska energija. [3]



Slika 10. Shema protustrujnog reaktora i faze rasplinjavanja [6]



Slika 11. Putevi rasplinjavanja biomase [20]

## Generatorski plin

Gorivi plin dobiven rasplinjavanjem naziva se generatorski plin. Izgaranjem plinovitih goriva, u usporedbi s krutim gorivima, dobiju se čišći dimni plinovi, a generatorski plin se može plinskim cijevima privesti baš onamo gdje je potreban plamen. Plinska goriva se bolje miješaju sa zrakom što utječe na smanjenje količine dimnih plinova koji izlaze u okoliš s temperaturom većom od okolišne, odnosno na smanjenje gubitaka osjetne topline dimnih plinova. Korištenjem plinskih goriva za kombinirane procese može se postići visok stupanj djelovanja. Gorivne komponente reaktorskog plina uključuju ugljični monoksid, vodik, metan, te male količine etana i propana. Reaktorski plin može sadržavati i određene količine ugljičnog dioksida i vodene pare. Točan sastav reaktorskog plina ovisi o temperaturama i tlakovima na kojima se proces odvija kao i o sastavu biomase. Načelno viši tlakovi pospješuju efikasnost pretvorbe ugljika, a proizvodi se i više metana i vodene pare. Više temperature potiču proizvodnju ugljičnog monoksida i vodika. Reaktorski plin na izlazu iz rasplinjača sadrži različite količine štetnih tvari kao što su spojevi dušika i sumpora, ugljikovodike (katran), te čestice pepela, te se prije daljnjeg korištenja u pravilu mora očistiti. Čišćenje nije nužno ukoliko je reaktorski plin predviđen za izravno izgaranje u ložištu. Reaktorski plin slabe je kvalitete i ogrjevna vrijednost je na razini 15-20% ogrjevnosti prirodnog plina. Smanjenje ogrjevnosti posljedica je razrjeđivanja plina s dušikom iz zraka koji je potreban za odvijanje procesa.[6]

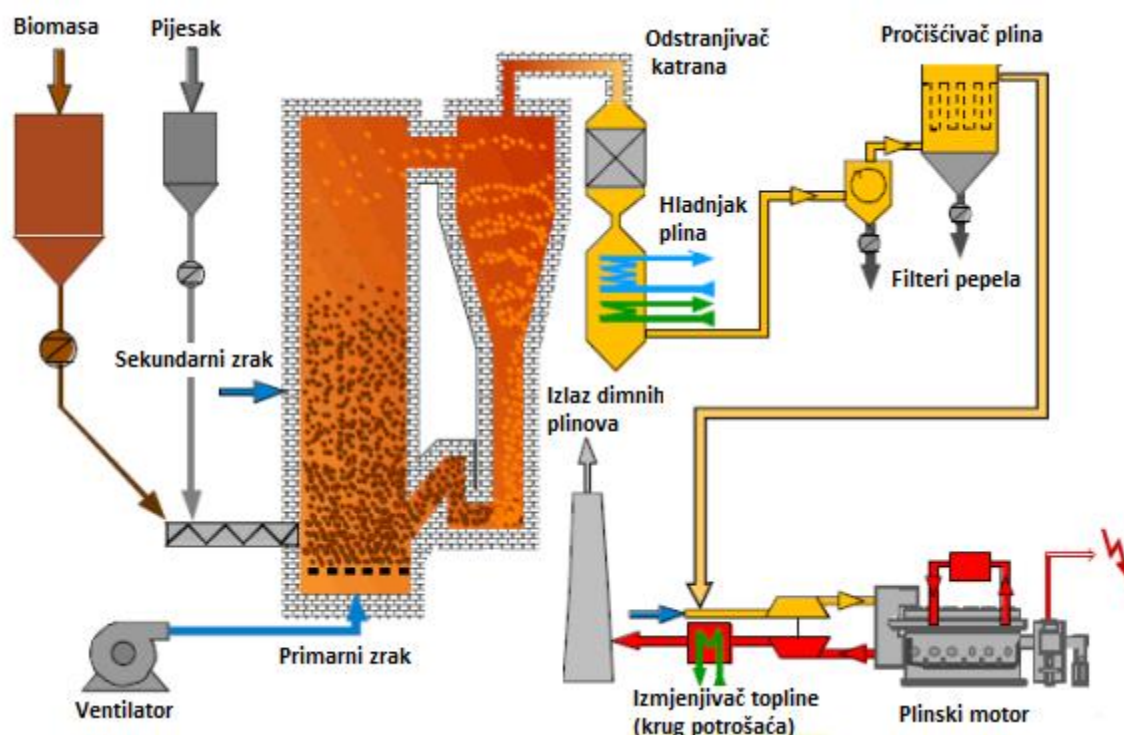
Rasplinjavanjem kisikom dovodi do značajnog povećanja ogrjevnosti, u usporedbi s rasplinjavanjem zrakom, zbog smanjene koncentracije dušika koji je negoriv plin. U slučaju rasplinjavanja biomase sa zrakom dobije se ogrjevna vrijednost generatorskog plina od 4-6 MJ/m<sub>n</sub><sup>3</sup>, dok rasplinjavanjem s kisikom ogrjevna vrijednost generatorskog plina iznosi 15-20 MJ/m<sub>n</sub><sup>3</sup> (m<sub>n</sub><sup>3</sup>-normni kubni metar).[7]

Važan faktor prilikom usporedbe različitih tipova generatora plina jest stupanj učinkovitosti pretvorbe koji govori koliki dio energije krutog goriva je prešao u plinovito gorivo.

$$\eta_{plina} = \frac{\text{Donja ogrjevna vrijednost generatorskog plina } [\frac{kJ}{kg}]}{\text{Donja ogrjevna vrijednost generatorskog plina } [\frac{kJ}{kg}]} \quad (5)$$

Temperatura generatorskog plina na izlazu ovisi o vrsti generatora plina, a može iznositi do 1000 °C. Kako bi se povećala gustoća, odnosno ogrjevnost po m<sup>3</sup>, generatorski plin se hladi, najčešće u izmjenjivačima plin-zrak. Prije postizanja konačne temperature odvija se čišćenje generatorskog plina u ciklonskom separatoru i vrečastom filtru.

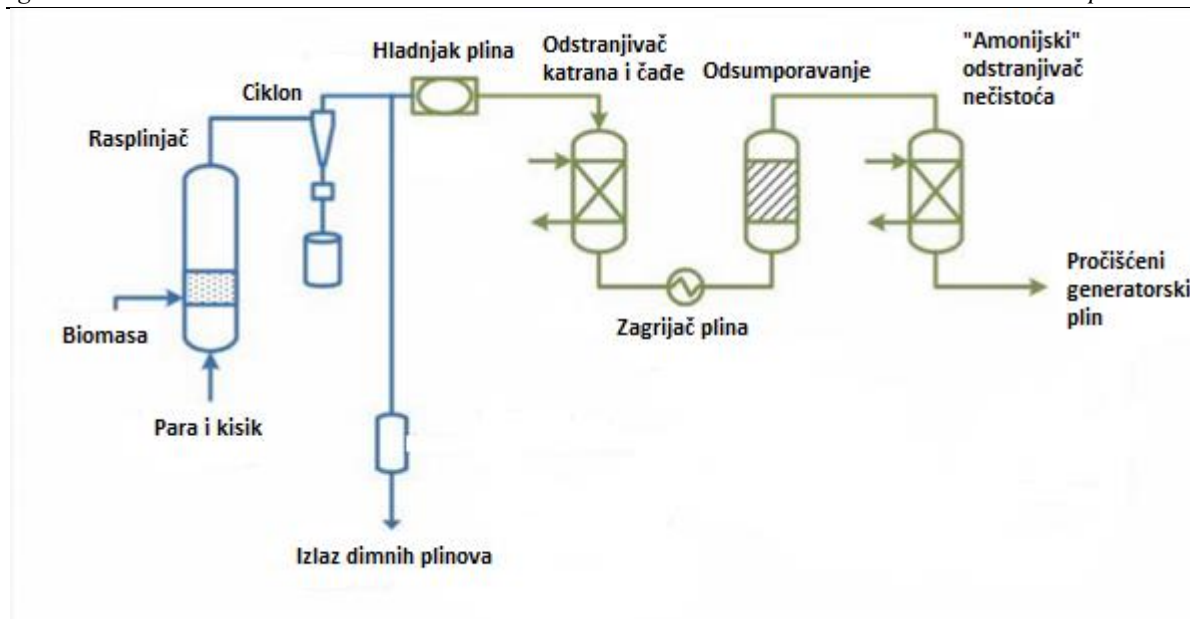
## Konfiguracija postrojenja



Slika 12. Shema postrojenja temeljenog na rasplinjavanju biomase [7]

Postrojenje koje se temelji na rasplinjavanju biomase (Sl.12) je kompleksnije nego već sada, konvencionalne tehnologije koje se temelje na izgaranju. Osim transporta biomase do kotlovnice te strojarne ovaj sustav ima manji podsustav pročišćavanja generatorskog plina. Rasplinjavanjem nastaje puno štetnih tvari. Da bi izgaranje teklo u što boljim uvjetima, te na poslijetku da bi dimni plinovi zadovoljili regulatorni okvir, generatorski plin se mora čistiti nakon izlaska iz rasplinjača.

Rasplinjavanjem nastaje katran, koji je težak (visoka molarna masa). Čađa, sumporovodik (H<sub>2</sub>S), amonijak (NH<sub>3</sub>), klorovodik (HCl) neke su od glavnih štetnih sastojaka generatorskog plina.



Slika 13. Shema pročišćavanja generatorskog plina [9]

U prvom koraku generatorski plin na izlazu iz rasplinjača uvodi se u multiciklon gdje se oslobađa krutih čestica i pepela. Nakon toga ohlađeni generatorski plin čisti se od čađe i katrana u pročišćivaču koji ih uklanja koristeći tekući medij (voda ili ulje), odnosno oplakivanjem toka plina. Katran kondenzira ili se otapa u ulju. Odsumporavanje je sljedeći korak, nakon kojeg slijedi pročišćavanje plina od amonijaka tekućim medijem.

Tehnologije rasplinjavanja osim nekih prednosti pokazuju i puno nedostataka. Generatorski plin slabe je kvalitete i ogrjevna vrijednost je na razini 15-20 % ogrjevnosti prirodnog plina. Smanjenje ogrjevnosti posljedica je razrjeđivanja plina s dušikom iz zraka koji je potreban za odvijanje procesa. Ukoliko se kao sredstvo za rasplinjavanje koristi kisik ili vodena para ogrjevna vrijednost reaktorskog plina dostiže i 40 % ogrjevnosti prirodnog plina. Niža ogrjevna vrijednost reaktorskog plina relativno je malen problem u usporedbi s problemom uklanjanja štetnih tvari koje nastaju procesom rasplinjavanja. Reaktorski plinovi dobiveni rasplinjavanjem biomase sadrže različite onečišćivače uključivo i kondenzirajuće ugljikovodike (katrane), čestice, alkalne spojeve i u manjoj mjeri spojeve sumpora i dušika. Ove tvari moraju biti uklonjene prije daljnje eksploatacije reaktorskog plina u svim slučajevima korištenja osim kod izravnog spaljivanja u ložištu kotla (kada se produkti izgaranja zadržavaju dovoljno dugo u ložištu na visokoj temperaturi što omogućava uništavanje štetnih spojeva).

## Općenito

Generatorski plin proizveden u rasplinjaču, pročišćen i filtriran spreman je za izgaranje u plinskom motoru koji radi na principu motora s unutarnjim izgaranjem. Električna energija se proizvodi prijenosom pravocrtnog kretanja klipova u V-cilindričnom motoru na radilicu (koljenasto vratilo), čijim se okretanjem ostvaruje zakretni moment, potreban za stalnu vrtnju rotora u asinkronom generatoru. Zbog inducirajućeg u zavojnicama, na statoru dolazi do proizvodnje izmjenične električne struje, koja nema dovoljan napon (10-15000 V) pa se isto povećava uporabom transformatora (trafostanica). Tako dobivena električna energija se putem električne mreže distribuira do potrošača, dok se viškovi električne energije pod zakonskim uvjetima prodaju u elektroenergetski sustav.

Istovremeno, u kogeneracijskom postrojenju se zbog rada plinskog motora s unutarnjim izgaranjem oslobađa velika otpadna toplina iz raznih segmenata uređaja, koja se kroz posebno i sustavno ugrađene elemente (izmjenjivači topline tipa shell&tube, armatura) koristi za zagrijavanje sekundarne radne tvari (voda). Najveći doprinos toplinskom učinku (ovisno o opterećenju plinskog motora u radu) daje otpadna toplina iz ispušnih plinova motora (dimovodni sustav ima temperaturu na ulazu otprilike 520°C, izlaz otprilike 120°C), koja se iskorištava u svrhu grijanja sekundarne radne tvari (vode), u zimskom periodu namijenjene za potrebe grijanja. Toplina dobivena iz vodenog hlađenja motora također ima značajnu vrijednost, koja se pridružuje ukupnom toplinskom učinku korisne topline iz kogeneracije, kao i onaj dio toplinskog učina dobivenog iz topline vodenim hlađenjem ulja za podmazivanje okretnih dijelova plinskog motora i generatora. [25]



Slika 14. Plinski motor [25]

Glavni nedostaci ovakve tehnologije su:

- kondenzat (katran, voda) u reaktorskom plinu zaostao nakon procesa čišćenja uzrokuje zaprljanje dijelova plinskog motora,
- varijacije ogrjevne vrijednosti reaktorskog plina, koje su posljedica nehomogenosti u biomasi koja se ubacuje u reaktor, nepovoljno utječu na kvalitetu pogona u otočnom režimu,
- sadržaj ugljičnog monoksida u ispušnim plinovima je visok i za više od tri puta premašuje granične vrijednosti (dopuštena razina emisije CO je 650 mg/m<sup>3</sup>), što zahtijeva dodatnu obradu ispušnih plinova.
- Osim metalnih uključevina na proces rasplinjavanja nepovoljno utječu i sitni komadi drveta i piljevina

U usporedbi ORC tehnologije i tehnologije koja koristi plinski motor promatrajući postrojenja manjih snaga – do 500 kW glavni nedostaci ORC tehnologije su visoki investicijski troškovi, dok plinskim motorima električna iskoristivost pada sa opterećenjem (iako rade s puno višom električnom iskoristivošću). Nedostaci pročišćavanja generatorskog plina nakon rasplinjavanja i kompleksnost postrojenja prikazana su u predhodnim poglavljima.

**Tablica 4. Usporedba ORC i plinskog motora manjih snaga**

Parametar	Plinski motor	ORC
Električna iskoristivost	30 – 38 %	10 – 20 %
Toplinska iskoristivost	45 – 50 %	70 – 85 %
Ukupna iskoristivost	75 – 85 %	85 – 95 %
Temperatura rashladne vode	85 - 100 °C	80 – 100 °C

## 4. KONFIGURACIJA ORC MODULA

### 4.1. Izbor radne tvari

Izbor radne tvari za ORC ciklus je najvažniji dio projektiranja ovakvih sustava. Budući da kogeneracijsko postrojenje mora osigurati režim rashladnog medija (vode) u režimu 90/70 ili 80/60, temperatura kondenzacije radne tvari nikako ne bi smijela biti ispod 100 °C. Budući da nam je toplinski izvor (termo ulje) na temperaturi oko 300 °C, temperatura isparavanja trebala bi se nalaziti između 260 °C i 280 °C. Naravno zbog izvedbe turbine i cijelog sustava tlak isparavanja mora biti u dozvoljenim granicama. Upravo su nam tlak isparavanja i tlak kondenzacije najvažniji parametri procesa, jer o njima ovise temperature isparavanja i temperature kondenzacije radne tvari. Prikazati će se rezultati za tri različite radne tvari, vrlo sličnih svojstava. Rezultati proračuna provedeni su simulacijom u običnom ORC postrojenju (isparivač, turbina, kondenzator, pumpa). Proračun je proveden tako da se na generatoru dobije neto električna snaga od 340 kW.

MDM – uz tlak isparavanja  $p_i = 11 \text{ bar}$  i tlak kondenzacije  $p_k = 0.2 \text{ bar}$  daje električnu iskoristivost  $\eta_e = 0.11$  uz protok radne tvari  $m_{rt} = 6.64 \text{ kg/s}$ .

TOLUENE - uz tlak isparavanja  $p_i = 15 \text{ bar}$  i tlak kondenzacije  $p_k = 0.8 \text{ bar}$  daje električnu iskoristivost  $\eta_e = 0.16$  uz protok radne tvari  $m_{rt} = 3.87 \text{ kg/s}$ .

EBENZENE - uz tlak isparavanja  $p_i = 11 \text{ bar}$  i tlak kondenzacije  $p_k = 0.3 \text{ bar}$  daje električnu iskoristivost  $\eta_e = 0.16$  uz protok radne tvari  $m_{rt} = 3.42 \text{ kg/s}$ .

TOLUENE sa nešto nižom temperaturom isparavanja i malo višim tlakom od 15 bar-a daje električnu iskoristivost od 16%. Uz mali podtlak u kondenzatoru i protokom tvari od 3.87 kg/s definitivno pokazuje bolja termodinamička svojstva od MDM-a i EBENZENE-a.

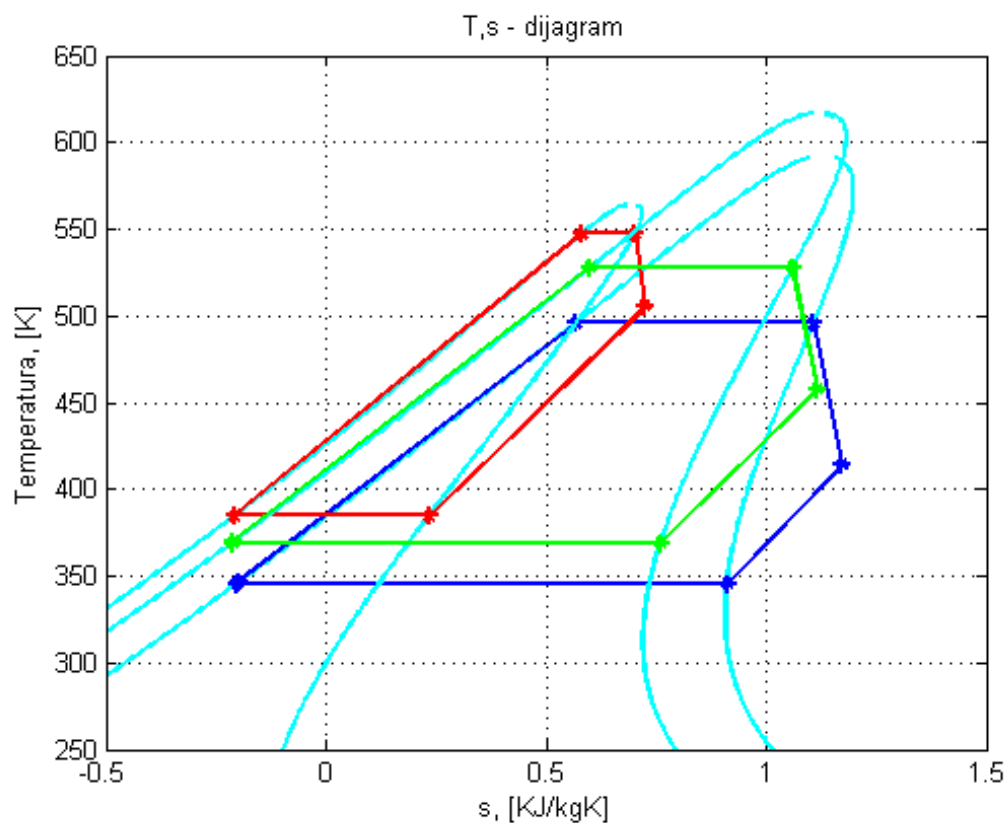
Usporedba MDM-a i EBENZENE-a – uz isti tlak isparavanja (kod EBENZENE-a je nešto niža temperatura isparavanja) i vrlo sličan tlak kondenzacije (slična temperatura kondenzacije), protok EBENZENE-a je skoro pa duplo manji 3.42 kg/s. Električna iskoristivost mu je za 5% veća nego kod MDM-a.

Za daljnji proračun postrojenja unatoč najlošijim pokazanim termodinamičkim svojstvima uzima se MDM, budući da je tržišno dostupan i ispitan već na nekoliko postrojenja.



**Tablica 5. Vrijednosti proračuna željene snage na turbini sa nekoliko radnih tvari**

Parametar	TOLUENE	EBENZENE	MDM
Molarna masa	92.1 g/mol	106,1 g/mol	236.53 g/mol
Formula	$C_7H_8$	$C_8H_{10}$	$C_8H_{24}O_2Si_3$
Tlak u kritičnoj točki	41.26 bar	36.2 bar	14.2 bar
Tlak isparavanja	15 bar	11 bar	11 bar
Temperatura isparavanja	515.64 K	527.69 K	547 K
Tlak kondenzacije	0.8 bar	0.3 bar	0.2 bar
Temperatura kondenzacije	375.48 K	369.22K	373 K
Protok radne tvari	3.87 kg/s	3.42 kg/s	6.64 kg/s
Snaga turbine	346.94 kW	346.94 kW	346.94 kW
Snaga pumpe	9.97 kW	6.54 kW	13.88 kW
Eta električni	0.16	0.16	0.11

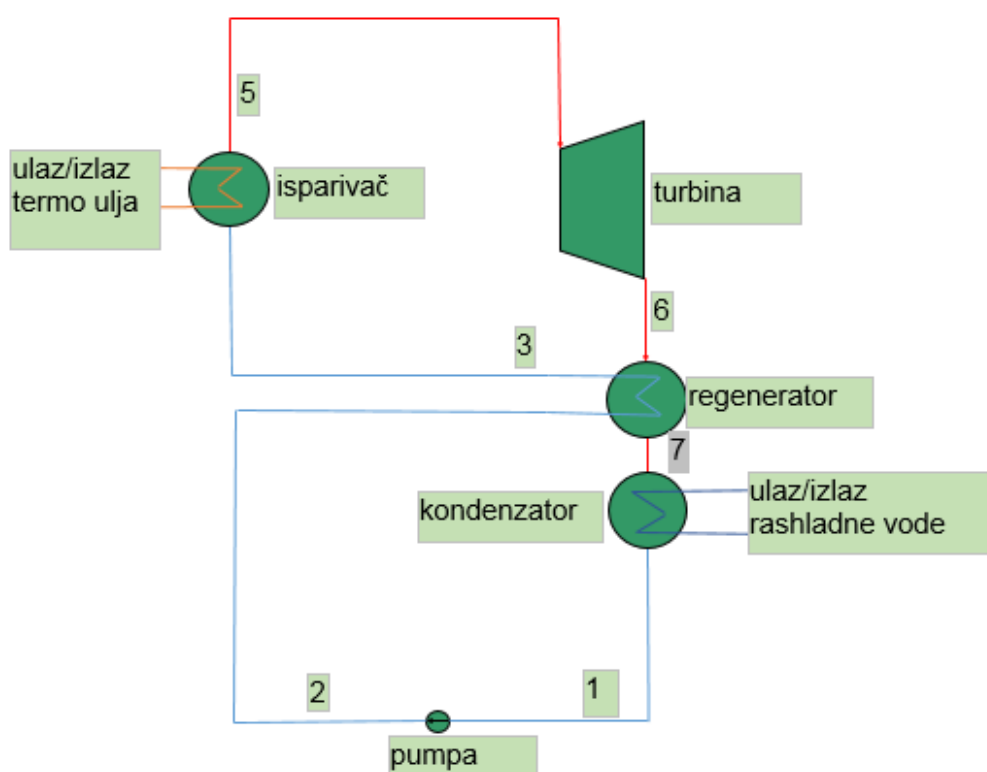
**Slika 15. Usporedba značajki radnih tvari**

## 4.2. Proračun ORC modula

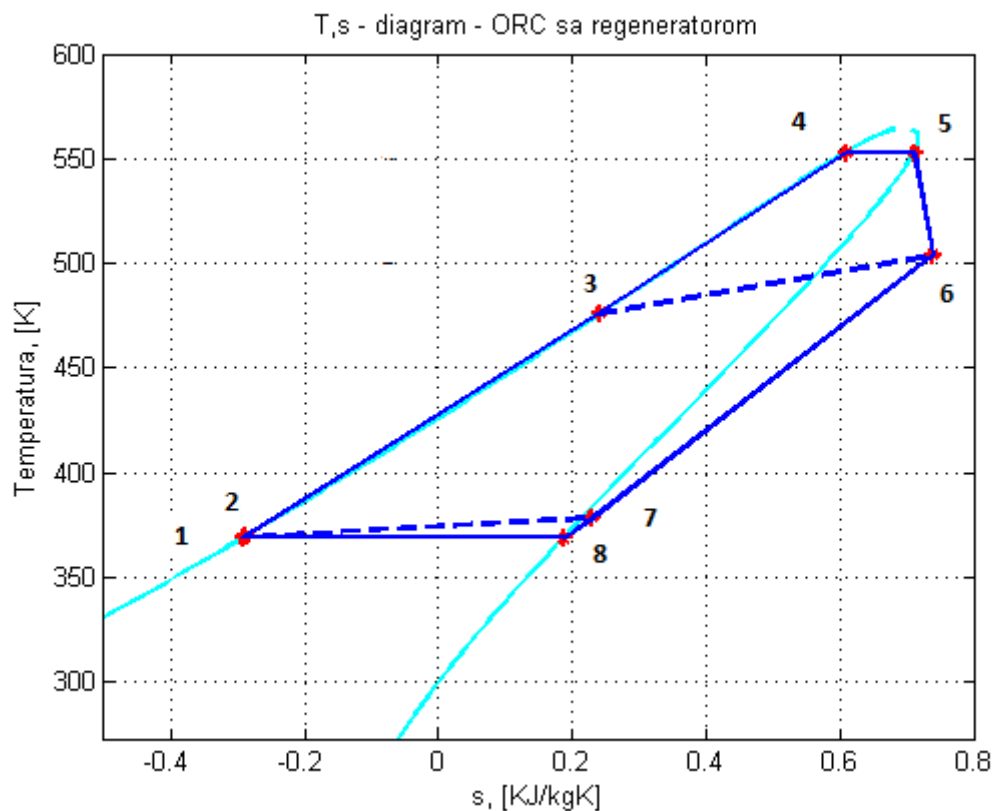
Budući da je u zadatku zadana neto električna snaga postrojenja od 300 kW, te toplinska snaga od 1200 kW, proračun kreće od turbine, s ciljem da se na električnom generatoru ostvari željena snaga. Prikazan je proračun ORC modula koji osim osnovnih komponenti (turbina, kondenzator, pumpa, isparivač) sadrži i regenerator. Regenerator podiže električnu iskoristivost i do 10 %. Proračun je zamišljen tako da se promjenom tlakova isparavanja i kondenzacije, uz zadanu temperaturu  $T_7$  (temperatura izlaska pregrijane pare iz regeneratora) simulira ORC proces uz zadanu radnu tvar. Izbor radne tvari za ORC modul je najvažniji dio projektiranja ovakvih postrojenja i potrebno mu je posvetiti posebnu pažnju. Algoritam je napravljen u MATLAB paketu, uz pomoć „CoolProp“ aplikacije za računanje funkcija stanja. Pojednostavljenja i pretpostavke proračuna:

- U turbinu ulazi suhozasićena para (točka 5)
- U pumpu ulazi vrela kapljevina (točka 1)
- Temperatura izlaska pregrijane pare iz regeneratora (točka 7) je 10 °C viša od temperature početka kondenzacije (točka 8)

Radi lakšeg praćenja proračuna dana je funkcionalna shema ORC modula na slici, kao i prikaz procesa u T, s dijagramu. T, s dijagram je posljedica prikazanog proračuna.



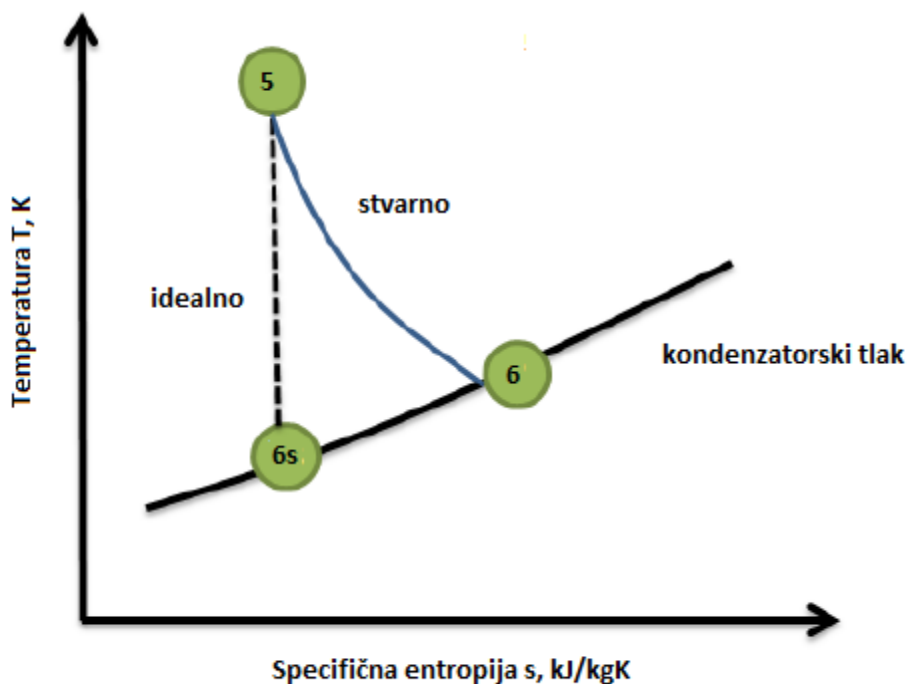
Slika 16. Funkcionalna shema ORC modula



Slika 17. Prikaz ORC procesa u T, s dijagramu

### 4.3. Turbina

Pri provođenju proračuna uzeta je električna iskoristivost generatora  $\eta_G = 0.98$  i izentropska iskoristivost turbine od  $\eta_T = 0.8$ . Razlika između idealnog i realnog procesa (Sl.18) u turbini definira se izentropskom iskoristivošću.



Slika 18. Izentropska iskoristivost turbine u T, s dijagramu [4]

Budući da nam je poznato stanje pare prije ulaska u turbinu (točka 5), lako dobijamo idealni proces turbine (točka 6s). Prema jednadžbi (6) računa se stanje pare na izlazu iz turbine (točka 6).

$$\eta_T = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_{6s}} \quad (6)$$

Sada kada imam poznate ulazne i izlazne parametre, računamo koliki mora biti protok radne tvari kroz turbinu da bi se ne generatoru dobila željena snaga.

$$m_{rt} = \frac{P_t}{h_5 - h_6} \quad (7)$$

Gdje se  $P_t$  računa prema jednadžbi (8).

$$P_t = \frac{P_n + P_{potr}}{\eta_G} \quad (8)$$

Gdje su  $P_n$  i  $P_{potr}$  neto predana snaga u mrežu, i potrebna snaga koju postrojenje treba za pogon (pumpe, ventilatori, ...).

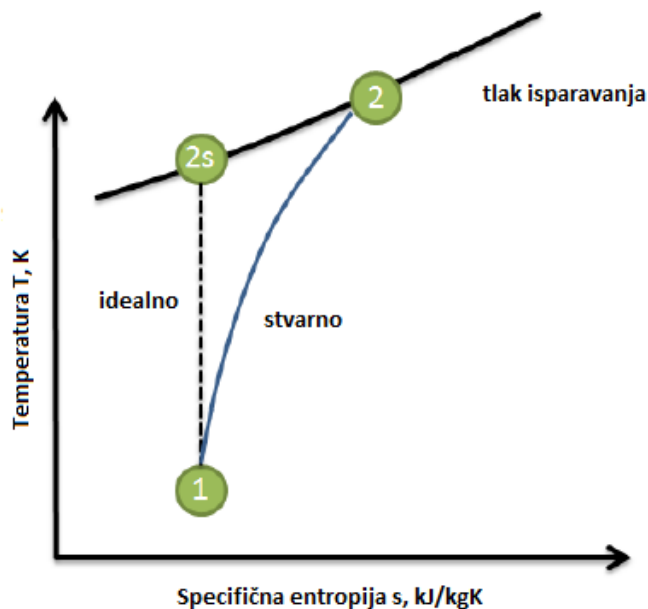
**Tablica 6. Pogonski parametri turbine**

Parametar	Vrijednost
$P_{potr}$	40 kW
$P_n$	300 kW
$h_5$	356,62 kJ/kg
$h_6$	301,01 kJ/kg
$T_5$	553,1 K
$T_6$	504,33 K
$m_{rt}$	6,24 kg/s

Da bi postrojenje pokrilo vlastitu potrošnju (40 kW) te da bi se ostvarila neto električna snaga na generatoru (300 kW), protok radne tvari kroz turbinu  $m_{rt}$  mora biti 6.24 kg/s. Proces se odvija između tlaka isparavanja  $p_i = 11 \text{ bar}$  i tlaka kondenzacije  $p_k = 0.17 \text{ bar}$ .

#### 4.4. Pumpa

Pumpa diže tlak radnoj tvari sa tlaka kondenzacije na tlak isparavanja i troši puno manji rad nego proizvodi turbina. Izentropska iskoristivost pumpe iznosi  $\eta_P = 0.7$ .



Slika 19. Izentropska iskoristivost pumpe u T, s dijagramu [4]

Kao i kod turbine u realnom slučaju postoji porast entropije (Sl.19), pa pumpa troši više rada nego u idealnom slučaju. Budući da su nam poznati parametri ulaska u pumpu, lako dobijamo idealni proces (točka 2s). Prema jednadžbi (9) računaju se parametri na izlazu iz pumpe (točka 2). Snaga pumpe računa se prema jednadžbi (10).

$$\eta_P = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (9)$$

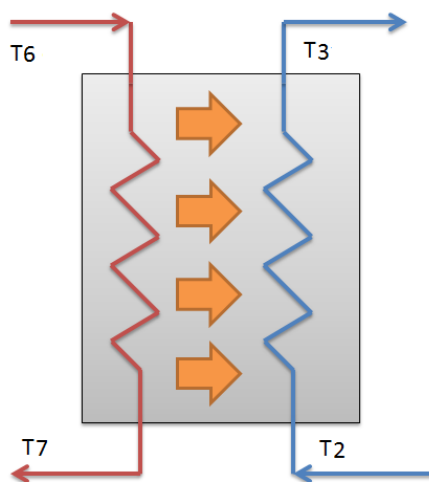
$$P_P = mrt * (h_2 - h_1) \quad (10)$$

Tablica 7. Pogonski parametri pumpe

Parametar	Vrijednost
$P_p$	14,18 kW
$h_1$	-115,83 kJ/kg
$h_2$	-113,55 kJ/kg
$T_1$	368,8 K
$T_2$	369,5 K

## 4.5. Regenerator

Regenerator služi podizanju iskoristivosti procesa. Nakon izlaska pregrijane pare iz turbine, para ulazi u regenerator gdje se hladi i zagrijava radnu tvar (prije ulaska u isparivač) koja se nakon izlaska iz pumpe digla na tlak isparavanja. Na taj način smanjuje se toplina koja se odvodi u kondenzatoru, ali i smanjuje toplina koja se mora dovesti u isparivač, odnosno koju kotao morao osigurati.



**Slika 20. Funkcionalni prikaz regeneratora [4]**

Budući da su nam poznate točke 6 i 2, točka 7 je pretpostavljena, jedina nepoznanica nam je točka 3. Nju ćemo lako dobiti iz jednadžbe, jer su toplinski tokovi iz jednadžbi jednaki.

Toplinski tok koji je predala pregrijana para računa se prema jednadžbi (11).

$$Q_{pp} = mrt * (h_6 - h_7) \quad (11)$$

Toplinski tok koji je primila vrela kapljevina na tlaku isparavanja, jednadžba (12).

$$Q_{vk} = mrt * (h_3 - h_2) \quad (12)$$

Gdje se površine za izmjenu topline računaju iz jednadžbe (13).

$$Q_{vk} = k_r * A_r * \Delta T_m \quad (13)$$

Koeficijent prolaza topline računa se prema jednadžbi (14).

$$k = \frac{1}{\frac{D_v}{D_u \alpha_u} + \frac{D_v}{2\lambda_c} \ln\left(\frac{D_v}{D_u}\right) + \frac{1}{\alpha_v}} \quad (14)$$

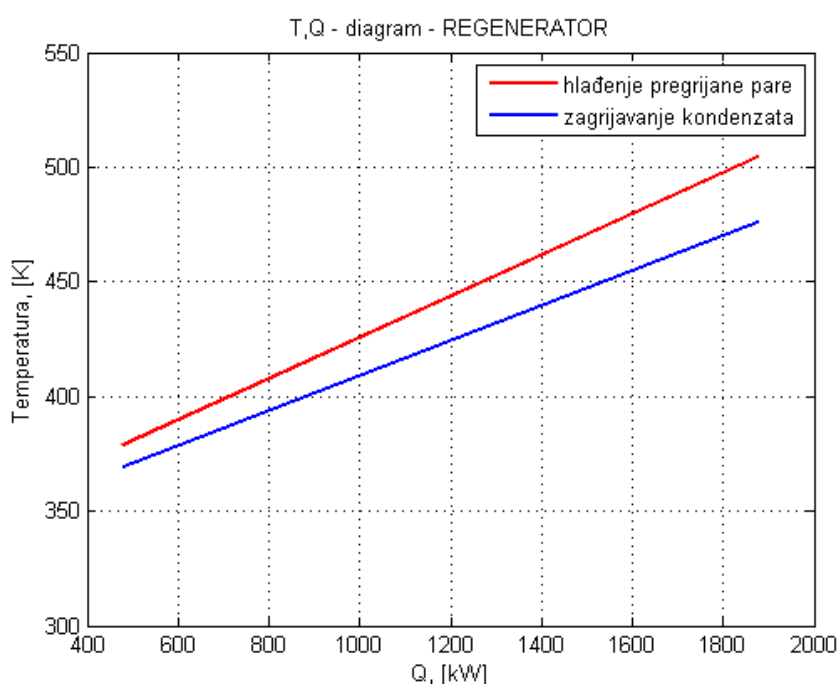
Budući da određivanje koeficijenta prijelaza topline (pogotovo u plaštu – oko cijevi) iziskuje poznavanje geometrije cijevi, položaj cijevi, broj i vrstu pregrada za proračun površina uzeti će se već izračunati koeficijenti prolaza topline  $k = 260 \text{ W/m}^2\text{K}$  prema [15].

Srednja logaritamska temperatura računa se prema jednadžbi (15).

$$\Delta T_{m,reg} = \frac{(T_6 - T_3) - (T_7 - T_2)}{\ln \frac{(T_6 - T_3)}{(T_7 - T_2)}} \quad (15)$$

**Tablica 8. Parametri regeneratora**

Parametar	Vrijednost
$h_7$	76,776 kJ/kg
$h_3$	110,67 kJ/kg
$T_7$	378,8 K
$T_3$	476,4 K
$Q_{reg}$	1398 kW
$A_{reg}$	323 m <sup>2</sup>



**Slika 21. Prikaz izmjene topline u regeneratoru**



#### 4.6. Isparivač

Isparivač se sastoji od predgrijača i isparivača, budući da u turbinu ulazi suhozasićena para. Budući da radnu tvar u isparivaču zagrijava toplinski tok doveden termo uljem iz termouljnog kotla, potrebno je riješiti sustav od tri jednačbe posebno za predgrijač, te posebno za isparivač. Toplinski tok koji isparivač mora primiti da bi radna tvar isparila, prema jednačbi (16).

$$Q_{isp} = m_{rt} * (h_4 - h_3) \quad (16)$$

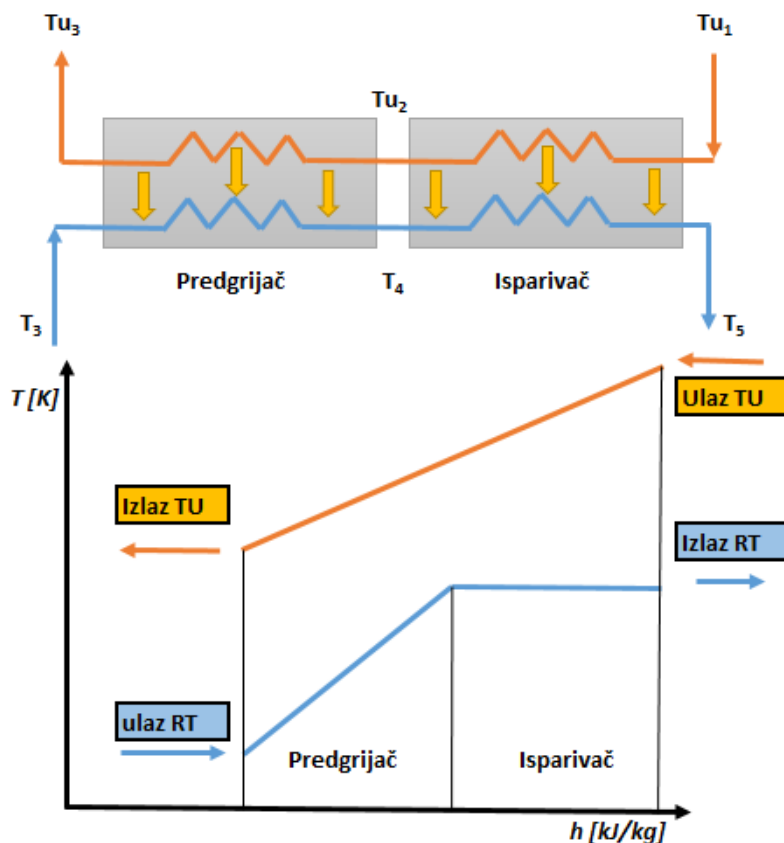
Toplinski tok koji termo ulje preda u isparivaču, prema jednadžbi (17).

$$Q_{ty} = m_{ty} * c_{ty} * (T_{y1} - T_{y2}) \quad (17)$$

Prema jednadžbi (18) se računa površina potrebna za izmjenu topline.

$$Q_{isp} = k_{isp} * A_{isp} * \Delta T_{m,isp} \quad (18)$$

Kako poznamo sve točke ciklusa, možemo dobiti sve izmjenjene toplinske tokove u predgrijaču i isparivaču. Nadalje uz pretpostavku ulazne temperature termoulja  $T_{u1}$  dobijamo izlaznu temperaturu termo ulja na izlazu iz isparivača  $T_{u2}$  i izlaznu temperaturu termo ulja  $T_{u3}$ .

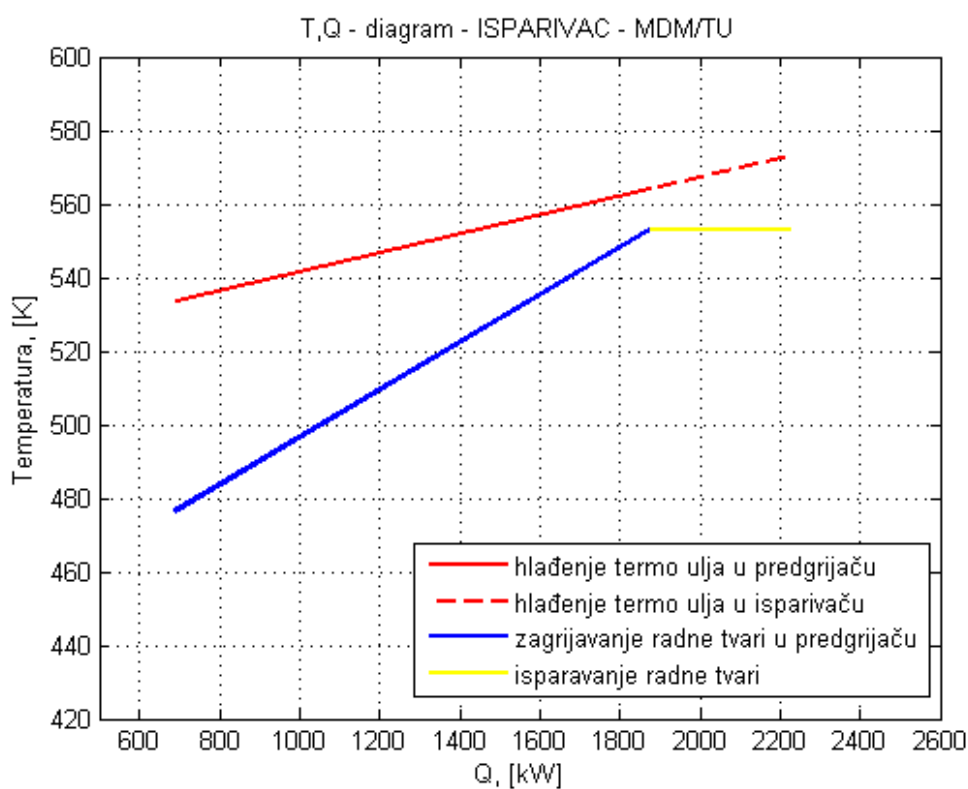


**Slika 22. Funkcionalni prikaz isparivača**

Kao i kod regeneratora uzeti su već izračunati koeficijenti prolaza topline za predgrijač  $k_{pr} = 350 \text{ W/m}^2\text{K}$  i isparivač  $k_{is} = 520 \text{ W/m}^2\text{K}$  prema [15].

**Tablica 9. Parametri isparivača**

Parametar	Vrijednost
$T_4$	553 K
$\Delta T_{m,isp}$	15 K
$\Delta T_{m,pred}$	28 K
$A_{isp}$	45 m <sup>2</sup>
$A_{pred}$	120 m <sup>2</sup>
$Q_{isp,uk}$	1534,1 kW
$A_{isp,uk}$	165 m <sup>2</sup>
$T_{u1}$	573,15 K
$T_{u3}$	533,48 K
$m_{tu}$	15,46 kg/s



**Slika 23. Prikaz prijenosa topline u isparivaču**

## 4.7. Kondenzator

Postupak izračuna kondenzatora sličan je proračunu isparivača. Kod isparivača smo zanemarili pregrijanje, a kod kondenzatora nema pothlađenja kondenzata. Također za svaki dio postavljamo tri jednačbe i računamo izlaznu temperaturu rashladne vode, budući da smo ulaznu pretpostavili. Postupak proračuna kondenzatora teče prema jednačbama (19, 20 i 21).

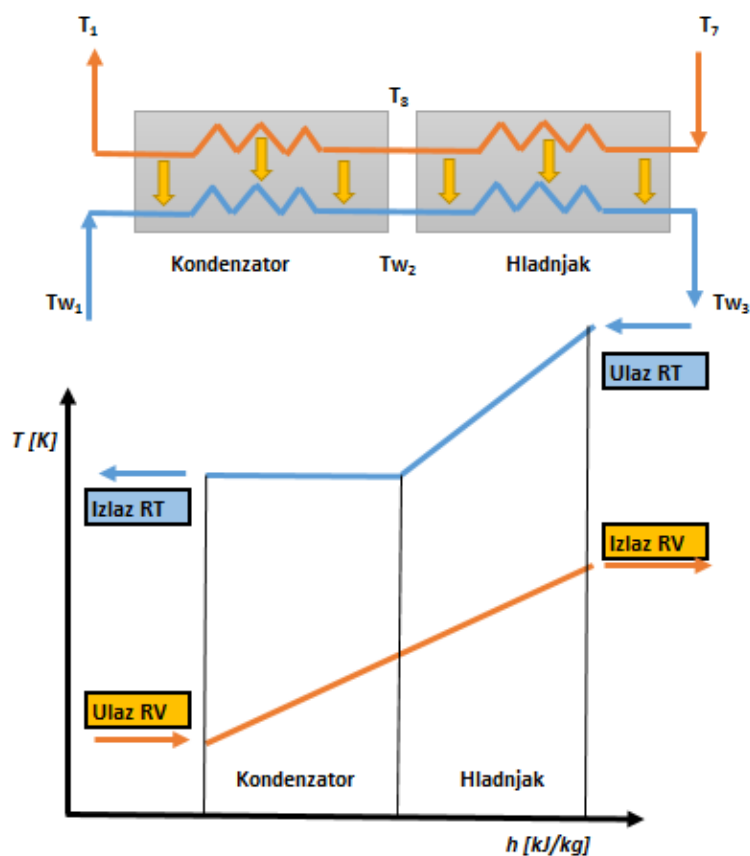
$$Q_{kond} = m_{rt} * (h_8 - h_1) \quad (19)$$

$$Q_{rv} = m_{rv} * c_{rv} * (T_{w3} - T_{w2}) \quad (20)$$

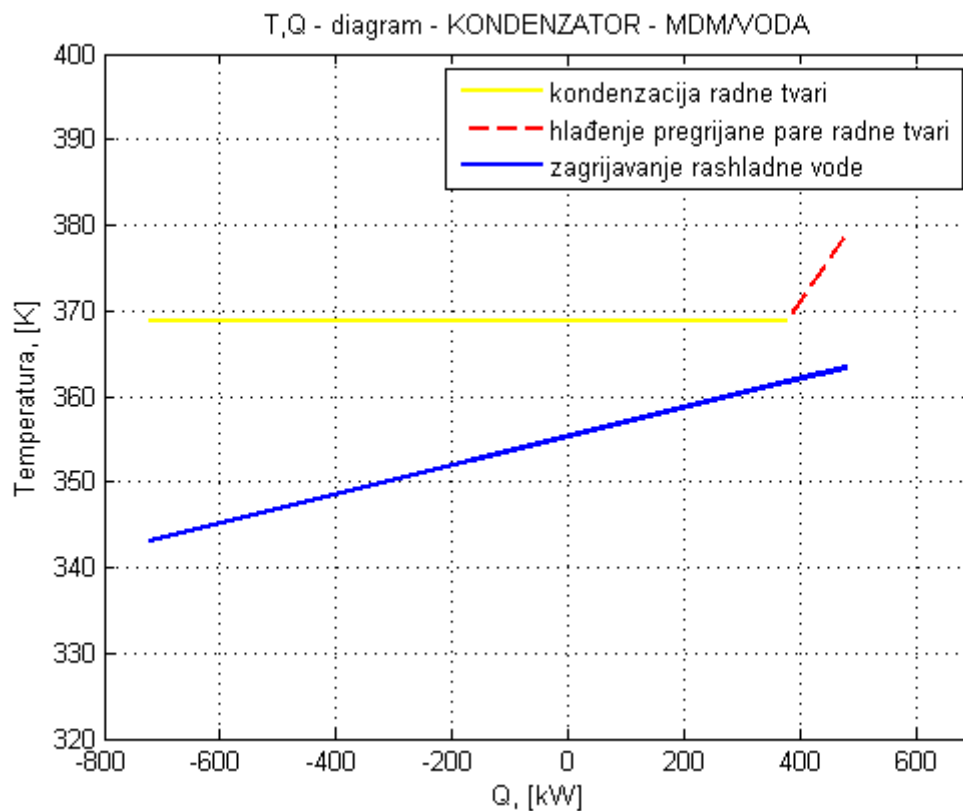
$$Q_{kond} = k_{isp} * A_{isp} * \Delta T_{m,isp} \quad (21)$$

**Tablica 10. Parametri kondenzatora**

Parametar	Vrijednost
$Q_{kond}$	1100,09 kW
$Q_{hlad}$	100 kW
$\Delta T_{m,kond}$	25,28 K
$\Delta T_{m,hlad}$	21,02 K
$A_{kond}$	124 m <sup>2</sup>
$A_{hlad}$	31 m <sup>2</sup>
$Q_{kond,uk}$	1200,4 kW
$A_{kond,uk}$	145 m <sup>2</sup>
$T_{w3}$	353,35 K
$T_{w1}$	333,15 K
$m_{rv}$	14,22 kg/s



Slika 24. Funkcionalni prikaz kondenzatora



Slika 25. Prikaz prijenosa topline u kondenzatoru

## 5. ODABIR LOŽIŠTA

Nakon što je proveden proračun ORC modul, a time i zadovoljeni parametri potrebni da bi se dobila željena snaga na generatoru, kao i zadani toplinski tok u kondenzatoru, sljedeći korak je odabir ložišta koje će opskrbljivati kotao utilizator te isparavati radnu tvar u isparivaču. Budući da su kod konfiguracija manjih od 500 kW ložište i kotao utilizator odvojeni, prvo će biti prikazan termodinamički proračun izgaranja u ložištu.

### 5.1. Termodinamički proračun izgaranja

Pretpostavke pri provođenju proračuna izgaranja:

- Unatoč dovođenju primarnog i sekundarnog zraka proračun je proveden kao potpuno izgaranje krutog goriva sa zadanim pretičkom zraka.
- U gorivu je zanemaren udio pepela.
- Kod računanja topline predane zračenjem stijenci ložišta, pretpostavljene su temperature stijenke.

Nakon provedenog termodinamičkog proračuna na izlazu iz ložišta dobija se temperatura dimnih plinova na izlazu iz ložišta, njihov sastav te toplinski tok predan zračenjem stijenkama opeke. Prikazan je proračun ložišta snage  $\phi = 2100 \text{ kW}$ , sa zadanim pretičkom zraka  $\lambda=1.3$ .

### Sastav goriva

Sastav drvne sječke sa 40 % vlage izražen je po kilogramu goriva i prikazan u tablici 11.

**Tablica 11. Sastav drvne sječke**

	Udio elementa	Mjerna jedinica
<i>c</i>	0,3	kgC/kgG
<i>o</i>	0,258	kgO <sub>2</sub> /kgG
<i>h</i>	0,036	kgH <sub>2</sub> /kgG
<i>n</i>	0,006	kgN <sub>2</sub> /kgG
<i>w</i>	0,4	kgH <sub>2</sub> O/kgG
$\Sigma$	1	

Donja ogrjevna vrijednost goriva računa se prema jednadžbi (22), prema [16].

$$\Delta h_d = 33900c + 117000 \left( h - \frac{o}{8} \right) - 2500w = 9608,75 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = 2,67 \left[ \frac{kWh}{kg} \right] \quad (22)$$

## Molni sastav goriva

Molni sastav goriva izražen je omjerom sastava goriva i molarne mase, i računa se prema jednadžbi (23). U tablici 12. prikazan je molni sastav goriva.

$$n_c = \frac{c}{M(c)} \quad (23)$$

**Tablica 12. Molni sastav goriva**

	Udio elementa	Mjerna jedinica
$n_c$	0,025	kmol_c/kg_G
$n_o$	0,0081	kmol_o/kg_G
$n_h$	0,0179	kmol_h/kg_G
$n_n$	0,0002	kmol_n/kg_G
$n_w$	0,0222	kmol_w/kg_G

## Minimalna količina kisika za izgaranje

Za potpuno izgaranje gorivih elemenata potrebna je količina kisika, prema [17]. Jednadžbe (24 – 26) opisuju molni, maseni i volumenski udio kisika za izgaranje.

$$O_{min} = n_c + 0,5n_h - n_o = 0,03 [kmol_o/kgG] \quad (24)$$

$$O_{MIN} = 2,664c + 7,937(h - o/8) = 0,83 [kg_o/kgG] \quad (25)$$

$$v_{Omin} = 1,864c + 5,55(h - o/8) = 0,58 [m_n^3/kgG] \quad (26)$$

## Minimalna i stvarna količina zraka za izgaranje

Minimalna masa zraka za izgaranje prema [17] računa se tako da se količina kisika podjeli sa udjelom kisika u zraku prema jednadžbama (27 – 29).

$$L_{min} = \frac{O_{min}}{0,21} = 0,12 [kmol_z/kg_G] \quad (27)$$

$$L_{MIN} = \frac{O_{MIN}}{0,23} = 3,57 [kg_z/kg_G] \quad (28)$$

$$v_{Lmin} = \frac{v_{Omin}}{0,21} = 2,76 [m_n^3/kg_G] \quad (29)$$

Stvarna masa zraka izračunava se preko faktora pretička zraka koje je za dano ložište izabrano  $\lambda = 1,30$ .

$$L_{stv} = \lambda L_{min} = 0,16 [kmol_z/kg_G] \quad (30)$$

$$L_{STV} = \lambda L_{MIN} = 4,65 [kg_z/kg_G] \quad (31)$$

$$v_{Lstv} = \lambda v_{Lmin} = 3,59 [m_n^3/kg_G] \quad (32)$$

## Kontrola ložišta

Mase dimnih plinova računaju se prema jednadžbama (33 – 36). Izgaranjem jednog mola ugljika (C), nastaje jedan mol ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>). Kada se jednadžba podijeli s molarnom masom ugljika (C) dobija se jednadžba (33). Analogno su izvedene i ostale jednadžbe.

$$m_{CO_2} = 3,664 c \quad (33)$$

$$m_{H_2O} = 9h + w \quad (34)$$

$$m_{O_2} = 0,232(\lambda - 1) L_{MIN} \quad (35)$$

$$m_{N_2} = n + 0,768 L_{STV} \quad (36)$$

Množina dimnog plina analogno jednadžbi (23) računa se prema jednadžbi (37).

$$n_{plina} = \frac{m_{pl}}{M_{pl}} \quad (37)$$

Normni volumen plina računa se prema jednadžbi (38).

$$v_{pl} = 22,41 n_{plina} \quad (38)$$

U tablici 13. dane su mase, množine i volumeni dimnih plinova. Sastav dimnih plinova nam je potreban za računanje teoretske, pa zatim stvarne temperature dimnih plinova. Na kraju i za izmjenjeni toplinski tok u utilizatoru, ekonomajzeru i zagrijaču zraka.

**Tablica 13. Mase, množine i volumeni dimnih plinova**

Plin	Oznaka	Udio plina	Mjerna jedinica
CO <sub>2</sub>	$m_{CO_2}$	1,099	kg_CO2/kg_G
	$n_{CO_2}$	0,025	kmol_CO2/kg_G
	$v_{CO_2}$	0,560	m_n^3/kg_G
O <sub>2</sub>	$m_{O_2}$	0,249	kg_O2/kg_G
	$n_{O_2}$	0,008	kmol_O2/kg_G
	$v_{O_2}$	0,174	m_n^3/kg_G
H <sub>2</sub> O	$m_{H_2O}$	0,724	kg_H2O/kg_G
	$n_{H_2O}$	0,040	kmol_H2O/kg_G
	$v_{H_2O}$	0,901	m_n^3/kg_G
N <sub>2</sub>	$m_{N_2}$	3,573	kg_N2/kg_G
	$n_{N_2}$	0,128	kmol_N2/kg_G
	$v_{N_2}$	2,858	m_n^3/kg_G

## Dimni plinovi

Mase i množine dimnih plinova (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) računaju se iz literature [17] prema jednadžbama (39 – 40).

$$m_{sdp} = m_{CO_2} + m_{O_2} + m_{N_2} = 4,92 [kg_{sdp}/kg_G] \quad (39)$$

$$n_{sdp} = n_{CO_2} + n_{O_2} + n_{N_2} = 0,16 [kmol_{sdp}/kg_G] \quad (40)$$



Teoretska količina suhih dimnih plinova računa se prema [17], premajednadžbi (41).

$$v_{sdp} = 1,853c + 0,7s + 0,8n + 0,79v_{Lmin} + 1,24(9h + w) = 2,74 [m_n^3/kg_G] \quad (41)$$

Količina dimnih plinova računa se prema jednadžbi (42).

$$v_{sdps} = v_{sdp} + (\lambda - 1)v_{Lmin} = 3,57 [m_n^3/kg_G] \quad (42)$$

Stavna količina dimnih plinova izražena je preko jednadžbe (43).

$$v_{vdp} = v_{sdp} + v_{H_2O} = 4,47 [m_n^3/kg_G] \quad (43)$$

Molni i maseni udjeli sudionika u dimnim plinovima izraženi su preko jednadžbi (44, 45), a prikazani rezultati se u tablici 14.

$$y_x = \frac{n_x}{n_{vdp}} \quad (44)$$

$$x_x = \frac{m_x}{m_{vdp}} \quad (45)$$

**Tablica 14. Molni i maseni udjeli dimnih plinova**

	Molni udio		Maseni udio	
CO <sub>2</sub>	$y_{CO_2}$	0,125	$x_{CO_2}$	0,195
O <sub>2</sub>	$y_{O_2}$	0,039	$x_{O_2}$	0,044
H <sub>2</sub> O	$y_{H_2O}$	0,200	$x_{H_2O}$	0,128
N <sub>2</sub>	$y_{N_2}$	0,636	$x_{N_2}$	0,633

Pomoću molnih i masenih udjela računaju se entalpije dimnih plinova.

## Protok goriva

Maseni protok goriva računa se prema jednadžbi (46), gdje je  $\eta_L = 0.99$  iskoristivost ložišta.

$$q_{mG} = \frac{\phi}{\eta_L h_d} = 0,22 [kg_G/s] \quad (46)$$

Molarni protok goriva izražen je jednadžbom (47).

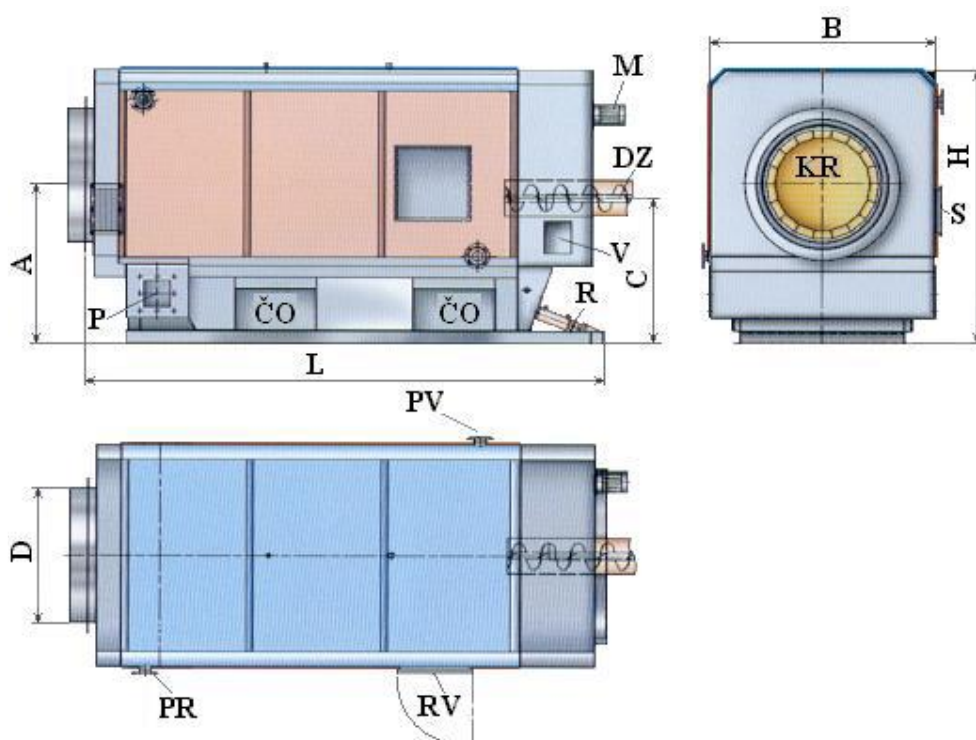
$$q_{nG} = \frac{q_{mG}}{M_G} = 0,016 [kmol/s] \quad (47)$$

## Dimenzije ložišta

Odabrane su unutarnje mjere ložišta prema katalogu proizvođača ložišta. Budući da su dane samo vanjske mjere ložišta, unutarnje, „ekranizirane“ mjere su procijenjene. Mjere su uzete za ložište TR-B 13N. Pomoću procijenjenih mjera i uvedenih nekoliko prethodno spomenutih pretpostavki, izračunata je i teoretska temperatura izgaranja, a nakon nje i stvarna. U tablici 15. dane su mjere, kao i površina i volumen ložišta.

**Tablica 15. Kataloška tablica mjera ložišta [1]**

Tip ložišta	Snaga ložišta [kW]	Snaga kotla utilizatora [kW]	B (širina) [mm]	H (visina) [mm]	L (dužina) [mm]	A [mm]	D [mm]	C [mm]	Masa kotla [kg]
TR-B 13N	2059	1750	1575	2034	3820	1199	1000	1079	8100



Slika 26. Kataloški prikaz ložišta [1]

U tablici 16. dane su dimenzije, kao i površina i volumen ložišta.

Tablica 16. Dimenzije ložišta [1]

L [mm]	B [mm]	H [mm]	A [m <sup>2</sup> ]	V[m <sup>3</sup> ]
3300	1600	1600	13,65	6,12

## Teoretska i stvarna temperatura izgaranja

Kada bi se izgaranje odvijalo u teoretskom ložištu, bez odvođenja topline, u ložištu bi vladala adijabatska temperatura izgaranja. U konkretnom slučaju izgaranje se odvija u neadijabatskom ložištu, odvođenjem topline kojom se zagrijava voda i ostalih gubitaka. Zbog toga će stvarna temperatura dimnih plinova na izlazu iz ložišta biti niža od teoretske temperature izgaranja. Budući da specifični toplinski kapacitet ovisi o temperaturi, jednadžba (50), teoretska temperatura izgaranja računa se iteracijama, prema jednadžbi (51), iz literature [17]. Teoretska temperatura izgaranja ovisi od donjoj ogrjevnoj vrijednosti goriva, sastavu dimnih plinova i specifičnom toplinskom kapacitetu dimnih plinova.

$$cp_{ndpt} = \text{lintepr}(cp_{ndp}, t_{dpt}) = 1,618 [kJ/m_n^3 K] \quad (48)$$

$$t_{dpt} = \frac{\eta_L H_d}{v_{vdp} cp_{ndpt}} + t_{ok} = 1334,74 [^{\circ}C] \quad (49)$$

Pretpostavljena stijenka ložišta  $t_{stij} = 1180 ^{\circ}C$ , emisijski faktor stijenke ložišta za šamotnu opeku uzet je  $\epsilon_L = 0.92$ . Emisijski faktor za zračenje plamena i plinova  $\epsilon_{pl} = 0.8$ . Geometrijski faktor smještaja plamena u ložištu uzet je  $\omega = 0.66$ . Univerzalna konstanta zračenja iznosi  $C_c = 5,67 [\frac{W}{m^2 K^4}]$ . Sve konstante uzete su iz dostupne literature [17].  $C_{12}$  konstanta ovisi o geometriji ložišta i emisijskim svojstvima plamena i ploha. Računa se prema jednadžbi (50).

$$C_{12} = \frac{C_c}{\frac{1}{\epsilon_{pl}} + \omega(\frac{1}{\epsilon_L} - 1)} = 4,34 [W/m^2 K^4] \quad (50)$$

Toplinski tok izražen po metru kvadratnom ovisi o temperaturi izgaranja i temperaturi stijenke i računa se prema jednadžbi (51).

$$q_{zr} = C_{12} \left[ \left( \frac{T_{stv}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{stij}}{100} \right)^4 \right] = 11620,4 [W/m^2] \quad (51)$$

Toplinski tok izmjenjen zračenjem u ložištu izražen je jednadžbom (52) i iznosi oko 160 kW.

$$\phi_{zr} = A q_{zr} = 158618,42 [W] \quad (52)$$

Nakon što smo izračunali odvedeni toplinski tok zračenjem u ložištu, sada možemo izračunati temperaturu dimnih plinova na izlazu iz ložišta, odnosno na ulazu u kotao utilizator.

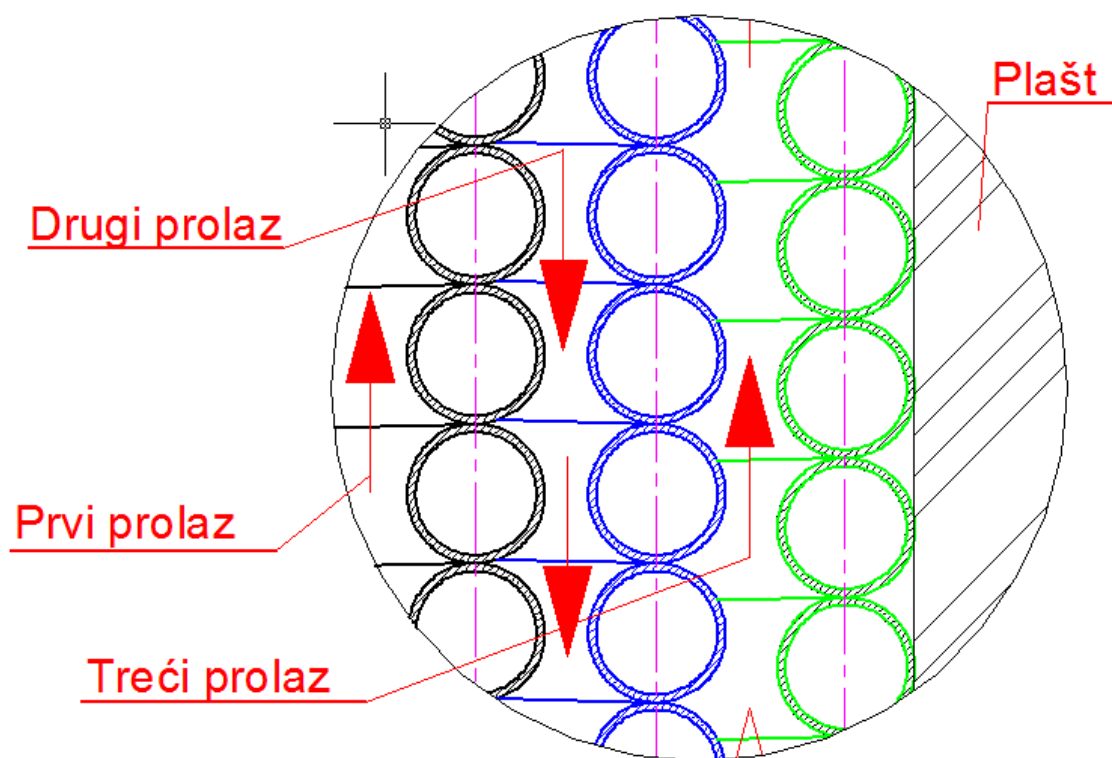
$$cp_{dp,stv} = \text{lintepr}(cp_{dp}, t_{stv}) = 35,9 [kJ/kmol K] \quad (53)$$

Stvarna temperatura izgaranja računa se prema jednadžbi (54) te analogno teorijskoj temperaturi izgaranja također se računa iteracijom. Stvarna temperatura izgaranja iznosi oko  $1240 ^{\circ}C$ .

$$t_{stv} = \frac{\eta_L q_{mG} H_d - Q_{zr}}{n_{vdp} cp_{dp,stv} q_{mG}} + t_{ok} = 1241,87 [^{\circ}C] \quad (54)$$

## 6. KOTAO UTILIZATOR

Najvažniji dio zagrijača predstavljaju cilindrično savijene cijevne spirale kroz koje cirkulira termo ulje posredstvom cirkulacijske pumpe. Zagrijač je vertikalne izvedbe. Izmjenjivač se sastoji od tri savijene cijevne zmijske. Dimni plinovi su u sekundaru i struje oko cijevnog snopa. Kotao utilizator je izveden sa tri prolaza. Termo ulje se zagrijava sa 260 °C na 300 °C, a dimni plinovi hlade sa 1240 °C na 310 °C i pri tome se izmjeni oko 1550 kW toplinskog toka. Važno je napomenuti nekoliko pretpostavki kod izračuna koeficijenta prijelaza topline kod ovakvog tipa izmjenjivača u daljnjem proračunu. Budući da za ovakav tip izmjenjivača ne postoji izravan način računanja koeficijenta prijelaza topline, već se parametri i koeficijenti dobivaju eksperimentalno za ovaj izmjenjivač napraviti će se neka pojednostavljenja, i koristit će se podaci sa sličnim cijevnim spiralama, kao i formule za računanje koeficijenta prijelaza topline. Strujanje u cijevima i izračun koeficijenta prijelaza topline na strani termoulja ( $\alpha_u$ ), računan je kao strujanje u ravnim cijevima. Koeficijent prijelaza topline oko cijevi ( $\alpha_{dp}$ ), računan je iz navedene literature. U prvom prolazu strujajući prema gore dimni plinovi polako putuju i izmjena topline je većinom zračenjem (konvekcija zanemarena). Nakon toga skreću u drugi prolaz gdje se izmjena topline događa većinom konvekcijom (zračenje zanemareno). Treći prolaz je isti kao i drugi gledajući način izmjene topline.



Slika 27. Skica izmjenjivačkih površina kotla utilizatora

## 6.1. Toplinski proračun

Termo ulje se nalazi u cijevima (primar) i ulazi u kotao sa temperaturom  $\vartheta'_1 = 260\text{ }^\circ\text{C}$ , a izlazi sa temperaturom  $\vartheta''_1 = 300\text{ }^\circ\text{C}$ , pri tlaku  $p_1 = 10\text{ bar}$ .

Dimni plinovi struje „oko“ cijevi (sekundar) i ulaze u kotao sa temperaturom  $\vartheta'_2 = 1240\text{ }^\circ\text{C}$ , a izlaze sa temperaturom  $\vartheta''_2 = 310\text{ }^\circ\text{C}$ , pri tlaku  $p_2 = 1\text{ bar}$ .

Srednja logaritamska temperaturna razlika računa se prema jednadžbi (55).

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\vartheta'_1 - \vartheta'_2) - (\vartheta''_1 - \vartheta''_2)}{\ln\left(\frac{\vartheta'_1 - \vartheta'_2}{\vartheta''_1 - \vartheta''_2}\right)} = 211,56\text{ }^\circ\text{C} \quad (55)$$

### Svojstva termo ulja DOWNTHERM Q

Svojstva termo ulja DOWNTHERM Q uzeta su za srednju temperaturu ulaska i izlaska iz kotla, iz prije spomenute „CoolProp“ aplikacije. Gustoća  $\rho_p = 768,95\text{ }[\text{kg}/\text{m}^3]$ , toplinski kapacitet  $c_{pp} = 2443,90\text{ }[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ , koeficijent vodljivosti  $\lambda_p = 0,0842\text{ }[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ , dinamička viskoznost  $\mu_p = 0,000201\text{ }[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ .

### Svojstva dimnih plinova

Svojstva dimnih plinova uzeta su za srednju temperaturu ulaska i izlaska iz kotla. Izračunata molarna masa dimnih plinova iznosi  $M_{dp} = 28,16\text{ }[\text{kg}/(\text{kmol})]$ , dok su sljedeći podaci uzeti prema [21]. Koeficijent vodljivosti  $\lambda_s = 0,115\text{ }[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ , dinamička viskoznost  $\mu_s = 0,000058\text{ }[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ .

Gustoća dimnih plinova se računa prema jednadžbi (56).

$$\rho = \frac{p_2}{R T_{sr}} = 0,32\text{ }[\text{kg}/\text{m}^3] \quad (56)$$

Specifični toplinski kapacitet računa se prema jednadžbi (57).

$$c_{ps} = \frac{C_{mdp}}{M_{dp}} = 1,33\text{ }[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (57)$$

## Maseni protoci termo ulja i dimnih plinova

Određivanje masenih protoka fluida biti će određeni za izmjenjeni toplinski tok od  $\phi = 1550 \text{ kW}$ . Maseni protok dimnih plinova iznosi  $m_s = 1,26 \text{ [kg/s]}$ .

Pretpostavljeni protok termo ulja  $q_v = 74,00 \text{ [m}^3/\text{h]}$ , gdje se iz jednadžbe (58) računa protok.

$$m_p = \frac{q_v \rho}{3600} = 15,81 \text{ [kg/s]} \quad (58)$$

Izmjenjeni toplinski tok koji primi termo ulje prema jednadžbi (59):

$$\phi = m_p \cdot c_{pp} \cdot (\vartheta_1'' - \vartheta_1') = 1545,15 \text{ [kW]} \quad (59)$$

Izmjenjeni toplinski tok koji predaju dimni plinovi prema jednadžbi (60):

$$\phi = m_s \cdot c_{ps} \cdot (\vartheta_2' - \vartheta_2'') = 1546,90 \text{ [kW]} \quad (60)$$

## Odabir cijevi

Odabrane su čelične bešavne cijevi DN 65 iz literature [22].

Vanjski promjer  $d_v = 76,1 \text{ [mm]}$ , unutarnji promjer  $d_u = 67,9 \text{ [mm]}$ , debljina stijenke  $s = 4,1 \text{ [mm]}$ .

## Koeficijent prijelaza topline na strani termo ulja

Budući da je zagrijač izveden iz tri cijevne zmije, brzina u cijevima računa se prema jednadžbi (61).

$$w_p = \frac{m_p}{3 A \rho_p} = 1,89 \text{ [m/s]} \quad (61)$$

Reynoldsov broj računa se prema jednadžbi (62), dok Prandtlov broj iznosi  $Pr = 5,82$ .

$$Re_p = \frac{w_p d_u \rho_p}{\mu_p} = 492563,9 \quad (62)$$

Izrazi koji vrijede za turbulentno strujanje na unutrašnjoj strani cijevi, uzimajući u obzir zakrivljenja cijevi i smjer toplinskog toka, glasi prema jednadžbi (63), prema [13].

$$\alpha_u = 0,012 Re^{0,87} Pr^{0,4} \frac{\lambda_p}{d_u} f_i \quad (63)$$

Gdje je  $f_i = 0,8$ , navedeni faktor uzima u obzir utjecaj zakrivljenja cijevi i smjer toplinskog toka. Područje primjene mu je za  $Re$  između 10 000 – 1 000 000 i  $Pr$  između 1,5 – 500. Koeficijent prijelaza topline u cijevima iznosi, prema jednadžbi (64).

$$\alpha_u = 2159,1 [W/m^2K] \quad (64)$$

### Određivanje najveće temperature filma

Budući da su termo ulja podložna raspadanju, odnosno koksiranju ukoliko im se temperatura poveća iznad kritične, potrebno je provjeriti maksimalnu temperaturu uljnog filma. Proračun je preuzet iz norme [13], kao i proračun koeficijenta prijeleza topline unutar cijevi. Iz jednadžbe (65) računa se temperaturni prirast u termičkom graničnom sloju. Gdje je  $q$  maksimalni toplinski tok, a  $f_0$  faktor koji uzima u obzir tangencijalno odvođenje topline u stijenci cijevi.

$$\Delta\vartheta = \frac{q}{\alpha_u} \frac{d_v}{d_u} f_0 = 13,8 [^{\circ}C] \quad (65)$$

Najveća temperaturna filma računa se prema jednadžbi (66).

$$\vartheta_i = \vartheta_{sr} + \Delta\vartheta \quad (66)$$

Analizirajući dvije prethodne jednadžbe vidimo da temperatura filma zadovoljava propise iz norme, budući da i ako ulje uđe u kotao sa  $\vartheta_{sr} = 300\text{ }^{\circ}C$ , to je ispod  $330\text{ }^{\circ}C$  koje je proizvođač naveo kao maksimalnu radnu temperaturu.

### Koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

Budući da se spomenuti koeficijent ne može izravno izračunati, postupak je obrnut. Odnosno, izračunali smo koeficijente za sva tri prolaza te dobili rezultat aritmetičkom sredinom prethodna tri. Koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova iznosi  $\alpha_{dp} = 40 [W/m^2K]$ .



## Koeficijent prolaza topline, površina izmjene topline

Kada smo odredili geometriju izmjenjivača, kao i koeficijente prijelaza topline prema (67), možemo odrediti potrebnu površinu izmjene topline, prema (68). Koeficijent prolaza topline računa se prema jednadžbi, gdje je koeficijent toplinske vodljivosti čelika  $\lambda_c = 59 [W/mK]$ .

$$k = \frac{1}{\frac{d_v}{d_u} \cdot \frac{1}{\alpha_u} + \frac{d_v}{2\lambda_c} \cdot \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_{dp}}} = 39,1 [W/m^2K] \quad (67)$$

Potrebna površina izmjene topline računa se prema jednadžbi (68).

$$A_v = \frac{\phi}{k \cdot \Delta\vartheta_m} = 187,5 [m^2] \quad (68)$$

## Izmjenjeni toplinski tok po prolazima

Pretpostavljanjem izlazne temperature dimnih plinova iz prolaza u prolaz i „namještanjem“ površine izračunat će se izmjenjeni toplinski tok za sva tri prolaza. U prvome prolazu dimni plinovi predaju toplinu zračenjem (konvekcija se zanemaruje), dok se u drugome i trećem prolazi izmjena topline događa većinom konvekcijom (zračenje zanemareno).

### Prvi prolaz

Proračun prvog prolaza dimnih plinova sličan je proračunu toplinskog toka predanog dimnih plinova površinama ložišta, budući da se radi o izmjeni topline zračenjem. Dimni plinovi nakon izlaska iz komore za dogorijevanje i smirivanja prije ulaska u kotao polako „lebde“ prema gore. U ovome prolazu preda se od 60 – 70 % ukupnog toplinskog toka u utilizatoru.

Odabire se izlazna temperatura dimnih plinova na kraju prvog prolaza  $\vartheta'_2 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ , emisijski faktor stijenke cijevi (čelik)  $\varepsilon_s = 0,27$ , emisijski faktor za zračenje plamena i plinova  $\varepsilon_{pl} = 0,8$ . Konstanta  $C_{12}$  računa se prema jednadžbi (69).

$$C_{12} = \frac{C_c}{\frac{1}{\varepsilon_{pl}} + \omega(\frac{1}{\varepsilon_s} - 1)} = 1,87 [W/m^2K^4] \quad (69)$$

Gustoća zračenja računa se prema jednadžbi, gdje su  $T_{dp}$  i  $T_s$  srednje temperature dimnih plinova i stijenske opeke.

$$q_{zr} = C_{12} \left[ \left( \frac{T_{dp}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 \right] = 29540,63 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (70)$$

Izmjenjeni toplinski tok u prvom prolazu iznosi, prema jednadžbi (71).

$$\phi_{zr} = A_{zr} q_{zr} = 996,71 \text{ [kW]} \quad (71)$$

Gdje je površina koja sudjeluje u izmjeni topline zračenjem  $A_{zr} = 33,74 \text{ [m}^2\text{]}$ , pola površine prve cijevne zmijske. Srednji koeficijent prijelaza topline iznosi, prema jednadžbi (72).

$$\alpha_{zr} = \frac{\phi_{zr}}{T_{dp} - T_s} = 40,41 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (72)$$

## Drugi prolaz

U drugom prolazu dimni plinove ulaze između dvije cijevne zmijske i „ubrzavaju“. Izmjena topline događa se konvekcijom. Proračun, odnosno pretpostavka koeficijenta topline za drugi i treći prolaz rađen je prema [18].

Izlazna temperatura dimnih plinova na kraju drugog prolaza  $\vartheta'_2 = 380 \text{ }^\circ\text{C}$ . Bezdimenzijski parametar cijevne zmijske  $\varphi$  definiran je prema jednadžbi (73), gdje su promjer cijevne zmijske  $D_c = 1,606 \text{ [m]}$  i „korak cijevne zmijske“  $P = 0,0761 \text{ [m]}$ .

$$\varphi = \frac{P}{\pi \cdot D_c} = 0,015 \quad (73)$$

$D_h$  je hidraulički srednji promjer cijevne zmijske i računa se prema jednadžbi (74).  $D_s$  je promjer veće cijevne zmijske, dok je  $d_0$  vanjski promjer cijevi.

$$D_h = \frac{D_s - \pi D_c d_0^2 \varphi^{-1}}{D_s - \pi D_c d_0 \varphi^{-1}} = 1,89 \quad (74)$$

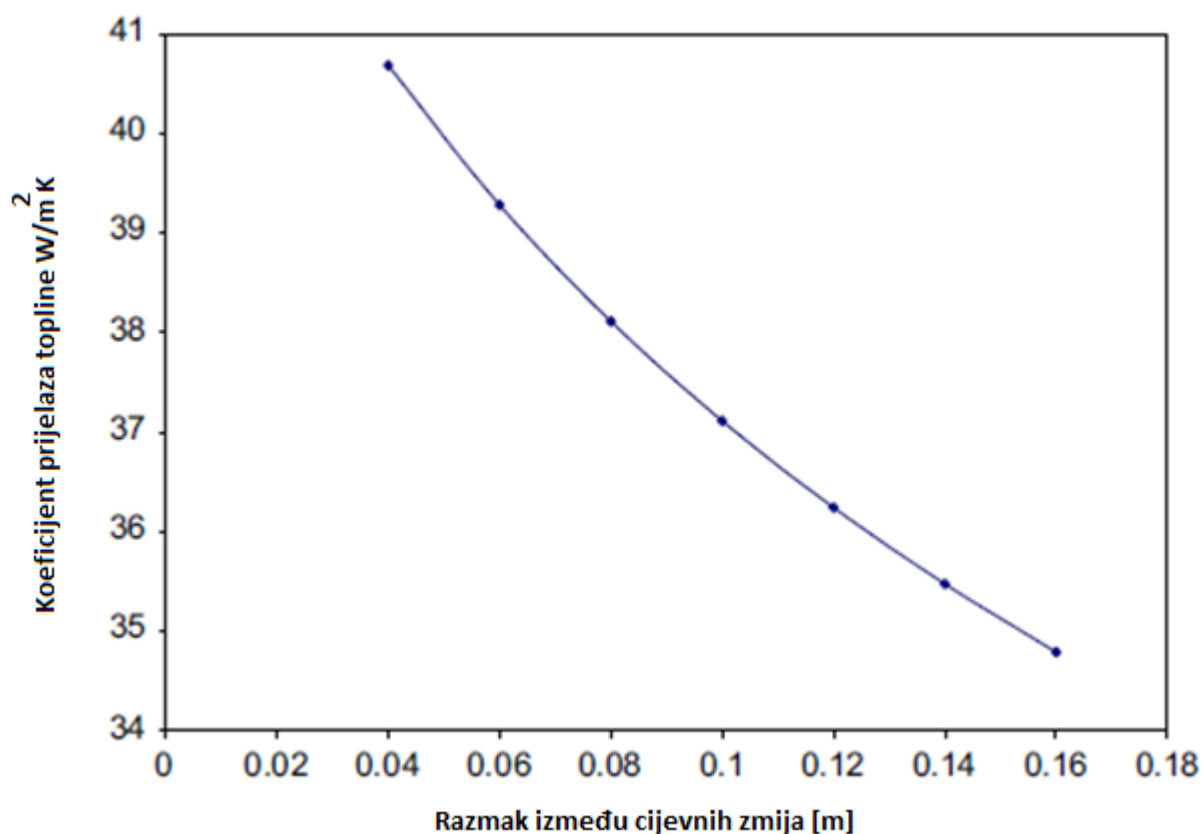
Odnos između manjeg i većeg promjera cijevne zmijske izražen je kao „gap ratio“ (GR), prema jednadžbi (75).

$$GR = \frac{D_0 - D_i}{d} = 2,63 \quad (75)$$

Sljedeća formula računa koeficijent prijelaza topline između dvije cijevne spirale i dobivena je eksperimentalnim putem, jednačba (76) te iz nje kao i iz prethodnih jednačbi proizlaze sljedeći dijagrami (Sl.28 i Sl.29).

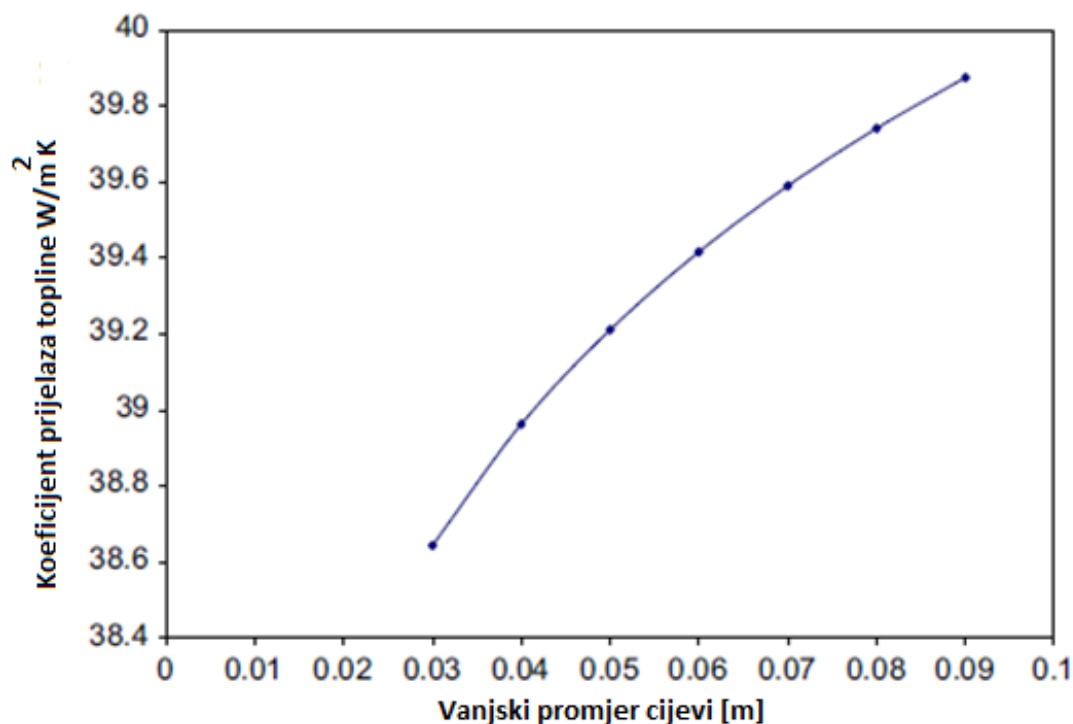
$$\alpha_s = \frac{\lambda_s}{d_v} 0,02652 Re^{0,834694285} Pr^{0,3} (GR)^{-0,096856199} \quad (76)$$

Budući da koeficijent prijelaza topline ne možemo izračunati, iščitavamo ga iz dijagrama koji vrijede za sličan izmjenjivač topline. Na dijagramu (Sl.28) je prikazan rast koeficijenta prijelaza topline sa smanjenjem razmaka između cijevnih zmija, odnosno sa smanjenjem površine između koje struje dimni plinovi. Za naš utilizator Coil gap = 0,07 m, stoga je koeficijent prijelaza topline izabran  $\alpha = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



Slika 28. Utjecaj udaljenosti cijevnih zmija na koeficijent prijelaza topline [18]

Na sljedećem dijagramu (Sl.29) prikazan je utjecaj povećanja vanjskog promjera cijevi na koeficijent prijelaza topline. Budući da su u našem slučaju cijevi  $d_v = 0,76 \text{ m}$ , koeficijent prijelaza topline i tu je oko  $\alpha = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



Slika 29. Utjecaj promjera cijevi na koeficijent prijelaza topline [18]

Uz iščitan  $\alpha$ , možemo izračunati toplinu koju dimni plinovi predaju u drugom prolazu, a u isto vrijeme i kontroliramo i zbrajamo površine radi provjere. Površina koja sudjeluje u drugom prolazu je pola površine prve cijevne zmiije i pola površine druge cijevne zmiije. Toplinski tok predan u drugom prolazu računa se prema jednadžbi (77).

$$\phi_{2p} = \alpha_s (\Delta\vartheta) A \quad (77)$$

Tablica 17. Rezultati proračuna drugog prolaza dimnih plinova

Oznaka	Iznos
$A_{2p}$	71,68 m <sup>2</sup>
$\alpha_s$	40 W/m <sup>2</sup> K
$\Delta\vartheta$	120 K
$\phi_{2p}$	344,07 kW

## Treći prolaz

Nakon drugog prolaza, dimni plinovi prije izlaska iz kotla skreću u treći prolaz. U prijenosu topline sudjeluje pola površine druge cijevne zmijske, i pola površine treće cijevne zmijske. Računa se na isti način kao i drugi prolaz, te će biti dani samo krajnji rezultati. Koeficijent prijelaza topline je isti budući da su geometrijski prolazi jednaki.

**Tablica 18. Rezultati proračuna trećeg prolaza dimnih plinova**

Oznaka	Iznos
$A_{3p}$	80,30 m <sup>2</sup>
$\alpha_s$	40 W/m <sup>2</sup> K
$\Delta\vartheta$	70 K
$\phi_{2p}$	224,83 kW

Ukupno izmjenjenja toplina iznosi, prema jednadžbi (78):

$$\phi_{3p} = \phi_{zr} + \phi_{2p} + \phi_{3p} = 1565,61 [kW] \quad (78)$$

Provjera površina, odnosno iz jednadžbi (79) se vidi da je  $A_v = A_{uk}$

$$A_v = \frac{\phi}{k \cdot \Delta\vartheta_m} = 187,5 [m^2] \quad (79)$$

$$A_{uk} = A_{zr} + A_{2p} + A_{3p} = 185,72 [m^2] \quad (80)$$

Sada kada su određene izmjenjivačke površine, koeficijenti prijelaza topline i geometrije cijevi, uz masene protoke dimnih plinova i termo ulja, mogu se simulirati procesi koji su vrlo mogući u praksi, te koje je neophodno promatrati radi sigurnosnih razloga.

## 7. MATEMATIČKI MODEL TERMOHIDRAULIČKIH PROCESA

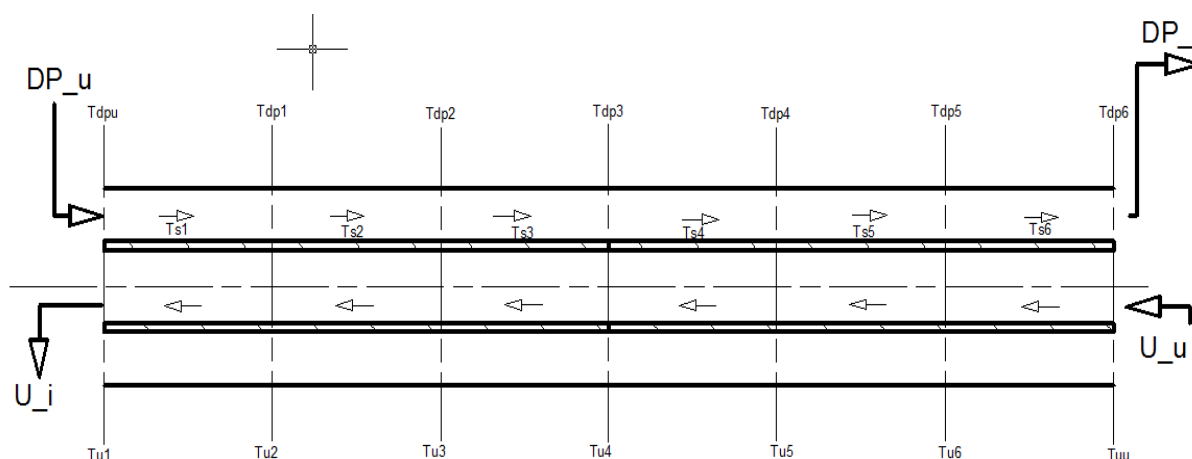
Termo ulje je jako osjetljivo na promjenu temperature, odnosno na temperaturama višim od 350 °C dolazi do raspadanja termo ulja, odnosno koksiranja. Također pri nagloj promjeni temperature termo ulja ono brže stari (oksidira) te mu se smanjuje životni vijek. Promjenom toplinskog opterećenja dešava se da se termo ulje dovoljno ne ohladi u isparivaču, te ne može primiti sav toplinski tok od dimnih plinova u kotlu utilizatoru. U ovome poglavlju pratiti ćemo promjene temperature termo ulja, i promjene temperatura dimnih plinova ovisno o četiri slučaja moguća u praksi. Povećanje temperature i protoka dimnih plinova u određenom trenutku, kao i povećanje temperature i protoka termo ulja u određenom trenutku.

### 7.1. Pojednostavljenje i opis matematičkog modela

Svaki problem u praksi potrebno je pojednostaviti kako bi se riješio potencijalni problem. Pretpostavke i zanemarenja u izradi matematičkog modela:

- Utilizator se promatra kao jedna ravna cijev oko koje protusmjerno struje dimni plinovi
- „Cijev“ je podjeljena na 6 segmenata, radi točnijih rezultata
- Zanemarena je izmjena topline dimnih plinova s okolinom
- Gustoća i specifični toplinski kapacitet materijala stijenke cijevi i radnih medija su konstantni
- Toplinski tok provođenjem kroz stijenku cijevi u aksijalnom smjeru zanemariti
- Hidraulički gubici zanemareni

Modelska shema cijevi sa kontrolnim volumenima može se vidjeti na slici 30.



**Slika 30. Modelska shema utilizatora sa kontrolnim volumenima**

## 7.2. Diferencijalne jednačbe

Postavljaju se diferencijalne jednačbe za sva tri sudionika, odnosno za dimne plinove, stijenku i termo ulje. Diferencijalna jednačba očuvanja energije za dimne plinove, prema jednačbi (81):

$$\frac{dT_{dp(n)}}{dt} = \frac{m_{dp} c_{dp} T_{dp(n-1)} - m_{dp} c_{dp} T_{dp(n)} - K_{dp} (T_{dp(n)} - T_{s(n)})}{M_{dp} c_{dp}} \quad (81)$$

Diferencijalna jednačba očuvanja energije za stijenku, prema jednačbi (82):

$$\frac{dT_{s(n)}}{dt} = \frac{K_{dp} (T_{dp(n)} - T_{s(n)}) - K_u (T_{s(n)} - T_{u(n)})}{M_c c_s} \quad (82)$$

Diferencijalna jednačba očuvanja energije za termo ulje, prema jednačbi (83):

$$\frac{dT_{u(n)}}{dt} = \frac{m_u c_u T_{u(n+1)} - m_u c_u T_{u(n)} + K_u (T_{s(n)} - T_{u(n)})}{M_u c_u} \quad (83)$$

$K_{dp}$  i  $K_u$  su koeficijenti prolaza topline na strani termo ulja, i dimnih plinova a računaju se prema jednačbama (84, 85).

$$K_{dp} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L_s}{\frac{1}{r_v \cdot \alpha_{dp}} + \frac{1}{\lambda_c \cdot \ln \frac{r_v}{r}}} \quad (84)$$

$$K_u = \frac{2 \cdot \pi \cdot L_s}{\frac{1}{\lambda_c \cdot \ln \frac{r}{r_u}} + \frac{1}{r_u \cdot \alpha_p}} \quad (85)$$

Gdje su  $M_{dp}$  masa dimnih plinova u jednom segmentu cijevi,  $M_c$  masa jednog segmenta stijenke jedne cijevi i  $M_u$  masa termo ulja u jednom segmentu cijevi.

$$M_{dp} = \frac{m_{dp}}{6} \quad (86)$$

$$M_c = \rho * L * \left( \frac{(D_v + 2 * \delta)^2 * \pi}{4} - \frac{D_u^2 * \pi}{4} \right) \quad (87)$$

$$M_c = \rho * L * \frac{D_u^2 * \pi}{4} \quad (88)$$

### 7.3. Stacionarno stanje

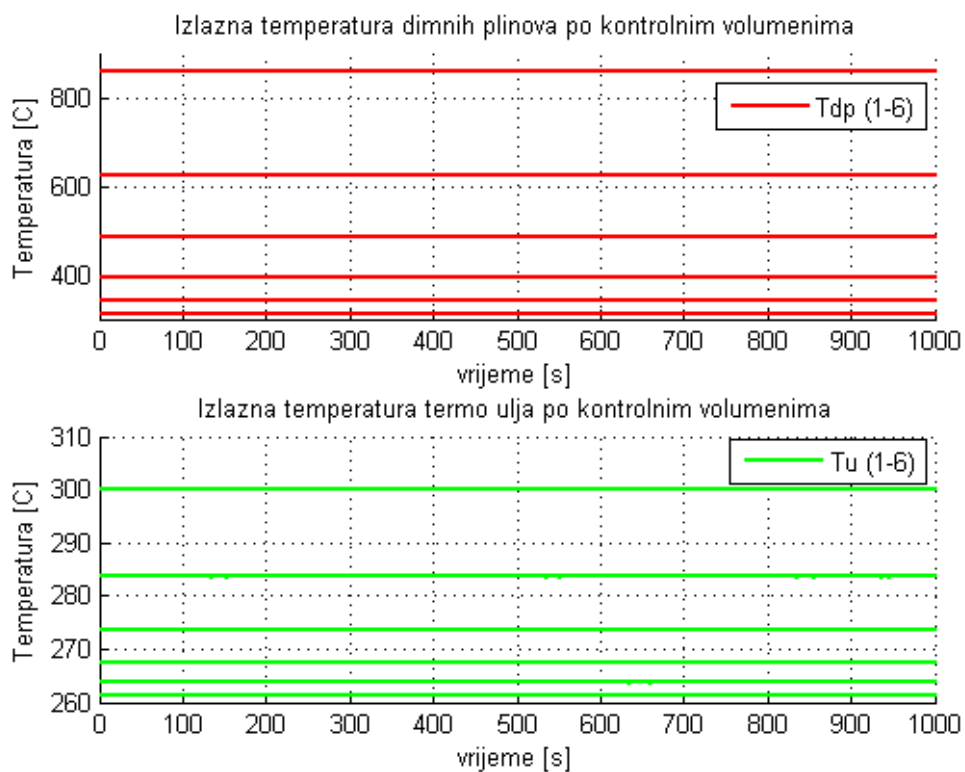
Budući da nam za rješenje diferencijalne jednačbe treba početni uvjet, prvo ćemo izračunati stacionarno stanje sustava, odnosno dobiti početne uvjete koji su nam potrebni kasnije za praćenje dinamike sustava. Budući da u stacionarnom stanju nema promjene parametara u ovisnosti o vremenu, prethodno prikazane diferencijalne jednačbe prelaze u sljedeći sustav nelinearnih algebarskih jednačbi (89 - 91):

$$m_{dp}c_{dp}T_{dp(n-1)} - m_{dp}c_{dp}T_{dp(n)} - K_{dp}(T_{dp(n)} - T_{s(n)}) = 0 \quad (89)$$

$$K_{dp}(T_{dp(n)} - T_{s(n)}) - K_u(T_{s(n)} - T_{u(n)}) = 0 \quad (90)$$

$$m_u c_u T_{u(n+1)} - m_u c_u T_{u(n)} + K_u(T_{s(n)} - T_{u(n)}) = 0 \quad (91)$$

Radi lakšeg zapisa i kasnijeg unošenja u kod, uvedene su konstante.  $C_1 = m_{dp} * c_{dp}$ ,  $C_2 = K_{dp}$ ,  $C_3 = m_u * c_u$ ,  $C_4 = K_u$ ,  $C_5 = M_{dp} * c_{dp}$ ,  $C_6 = M_u * c_u$ ,  $C_7 = M_c * c_c$ .



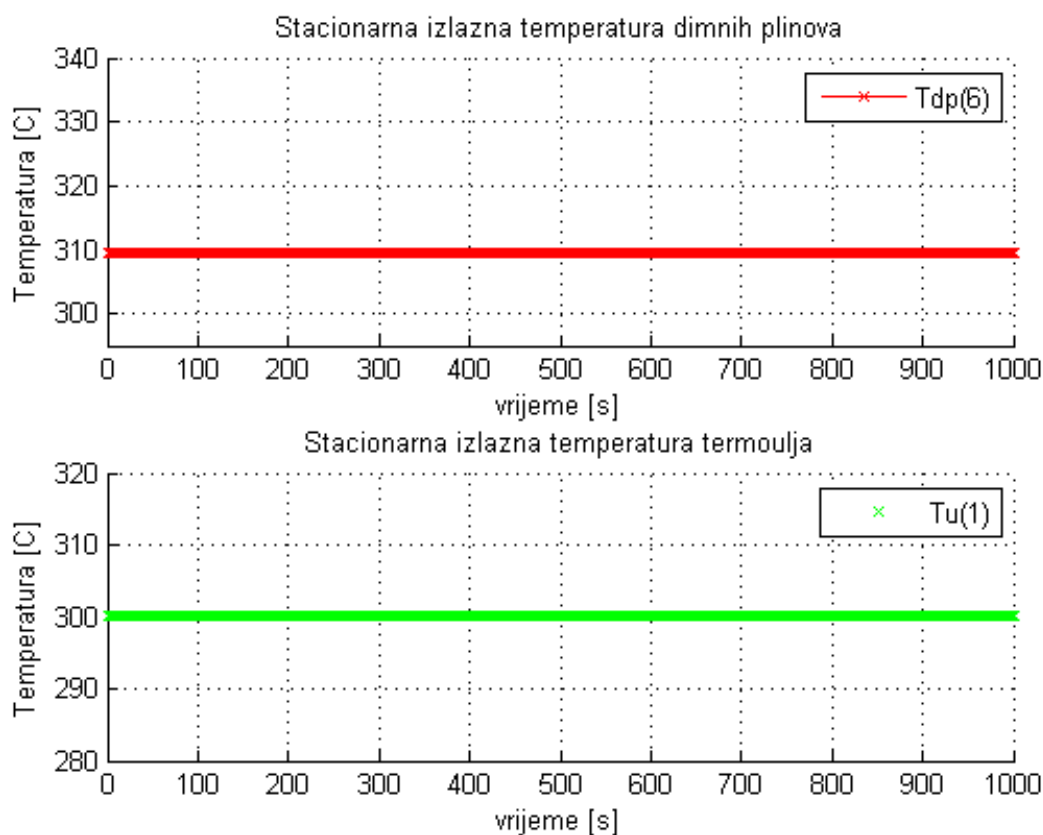
Slika 31. Prikaz temperatura u stacionarnom stanju



Budući da su nama poznate ulazne temperature termo ulja i dimnih plinova, imamo sustav od 18 jednadžbi sa 18 nepoznanica (budući da smo cijev podijelili na šest dijelova). Sustav je riješen funkcijom „fsolve“ u matlab paketu. Fsolve se koristi za rješavanje nelinearnih algebarskih jednadžbi. Sustav jednadžbi se zapisuje u obliku funkcije  $F(x)=0$  gdje funkcija  $F$  predstavlja vektor funkcija.  $X$  predstavlja nepoznanice, odnosno u našem slučaju temperature. Fsolve radi na principu iteracije, tako da  $x_0$ , odnosno početne temperature moramo pretpostaviti. Kada pretpostavimo temperature, dobijamo početne uvjete koji su nam potrebni za rješenje diferencijalne jednadžbe. Na slici 38. vidimo da su temperature točno izračunate i da su jednadžbe dobro postavljene, budući da su na dijagramu temperature horizontalni pravci.

#### 7.4. Odzivi naglih promjena

U sljedećim poglavljima biti će prikazani odzivi izlaznih temperatura dimnih plinova i termo ulja ovisno o poremećaju u danom trenutku. Izlazne temperature dimnih plinova i termo ulja prikazane su (Sl.32) gdje se vidi da se poklapaju s pretpostavljenim temperaturama u prethodnim poglavljima.

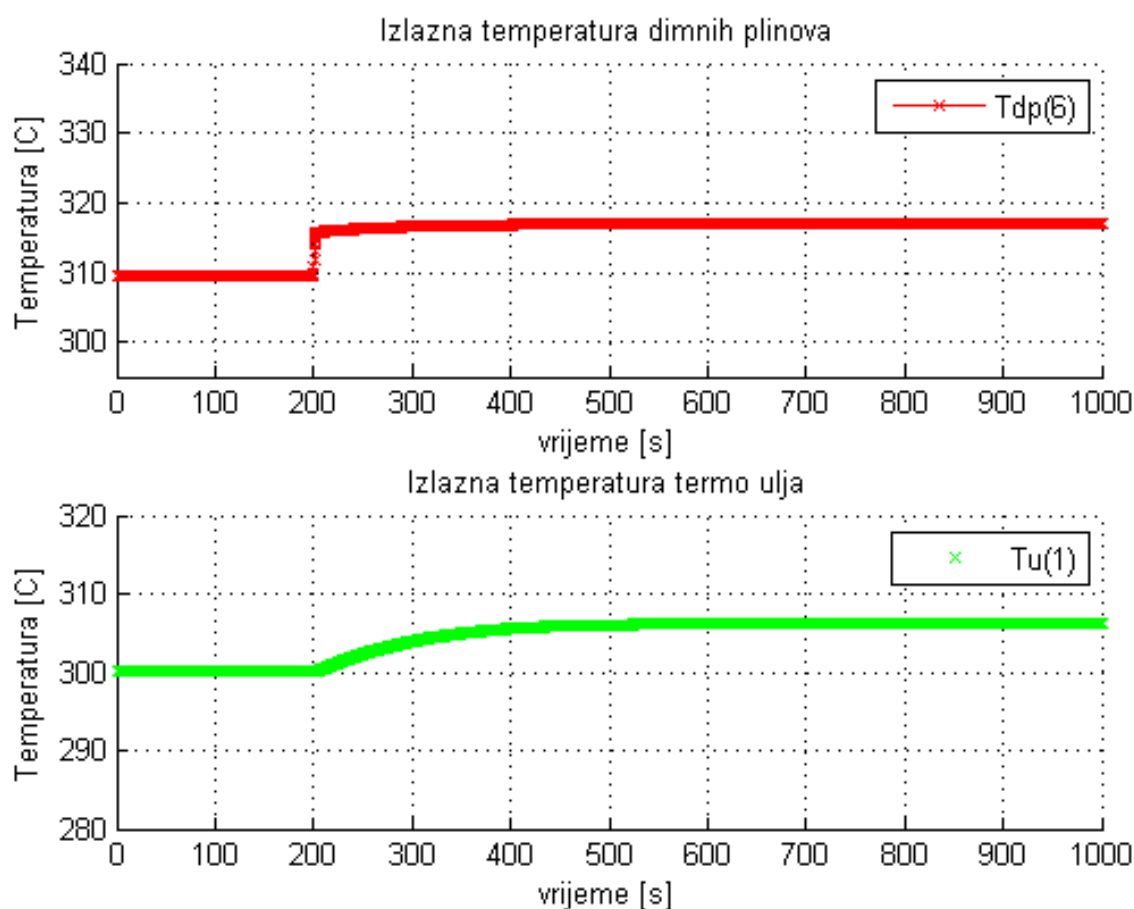


Slika 32. Stacionarne temperature dimnih plinova i termo ulja

#### 7.4.1. Povećanje ulazne temperature dimnih plinova

Bitno je naglasiti još jednu stvar kod dinamike sljedeće opisanih procesa. Budući da koeficijent prijelaza topline ovisi o protoku medija, u proračunu je uzeta u obzir funkcijska veza protoka o koeficijentu prijelaza topline  $\alpha(m)$ .

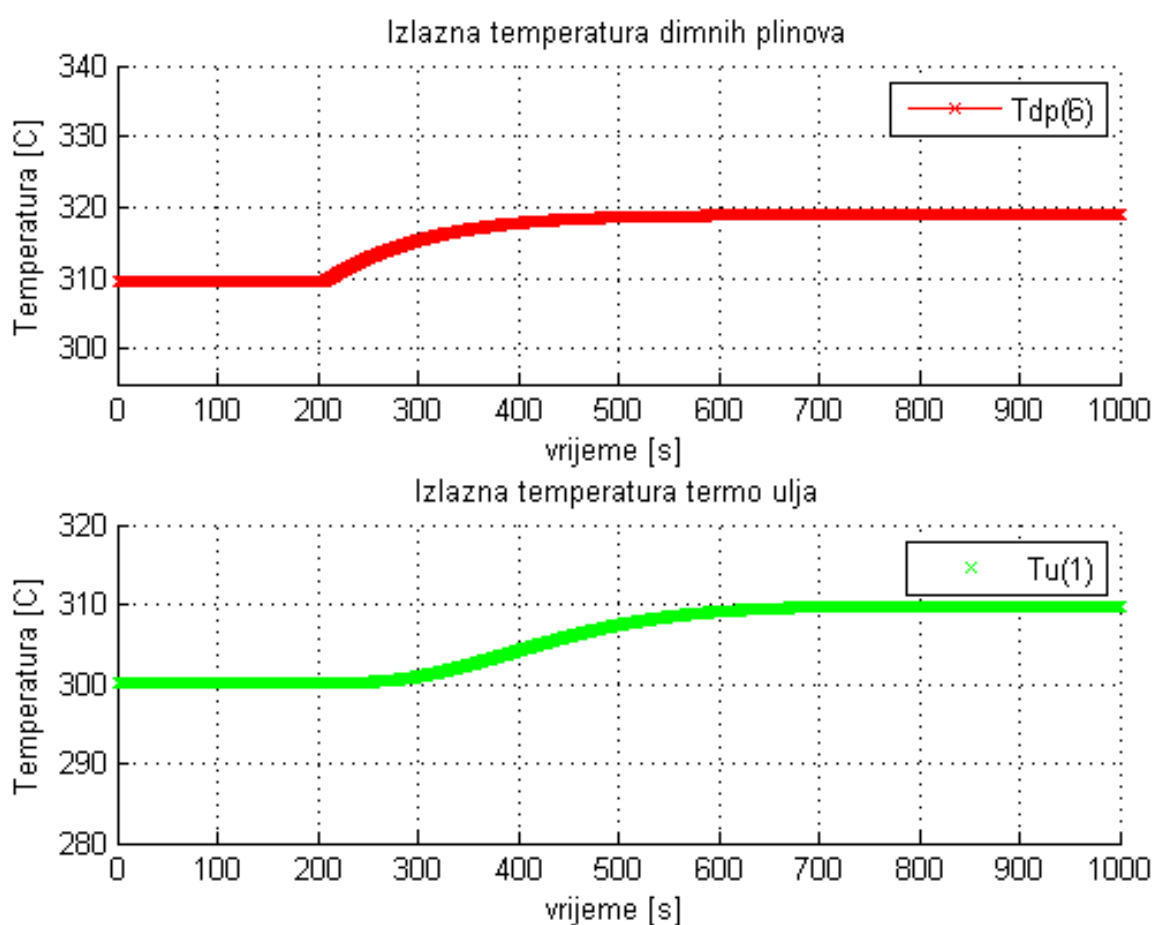
Sljedeći dijagram prikazuje odzive izlaznih temperatura pri naglom povećanju ulazne temperature dimnih plinova za 150 °C, sa 1240 °C na 1390 °C u 200. sekundi. Izlazna temperatura dimnih plinova se podigla za manje od 10 °C, kao i izlazna temperatura termo ulja što je realno i za očekivati. Izlazna temperatura termo ulja podigla se za manje od 10 °C. Povećanje temperature termo ulja je razumno, budući da dimni plinovi nose više energije. Povećanje temperature dimnih plinova na izlazu je također logično, budući da nisu „stigli“ predati svu toplinu radi površine izmjenjivača.



Slika 33. Odzivi na poremećaj ulazne temperature dimnih plinova

### 7.4.2. Povećanje ulazne temperature termo ulja

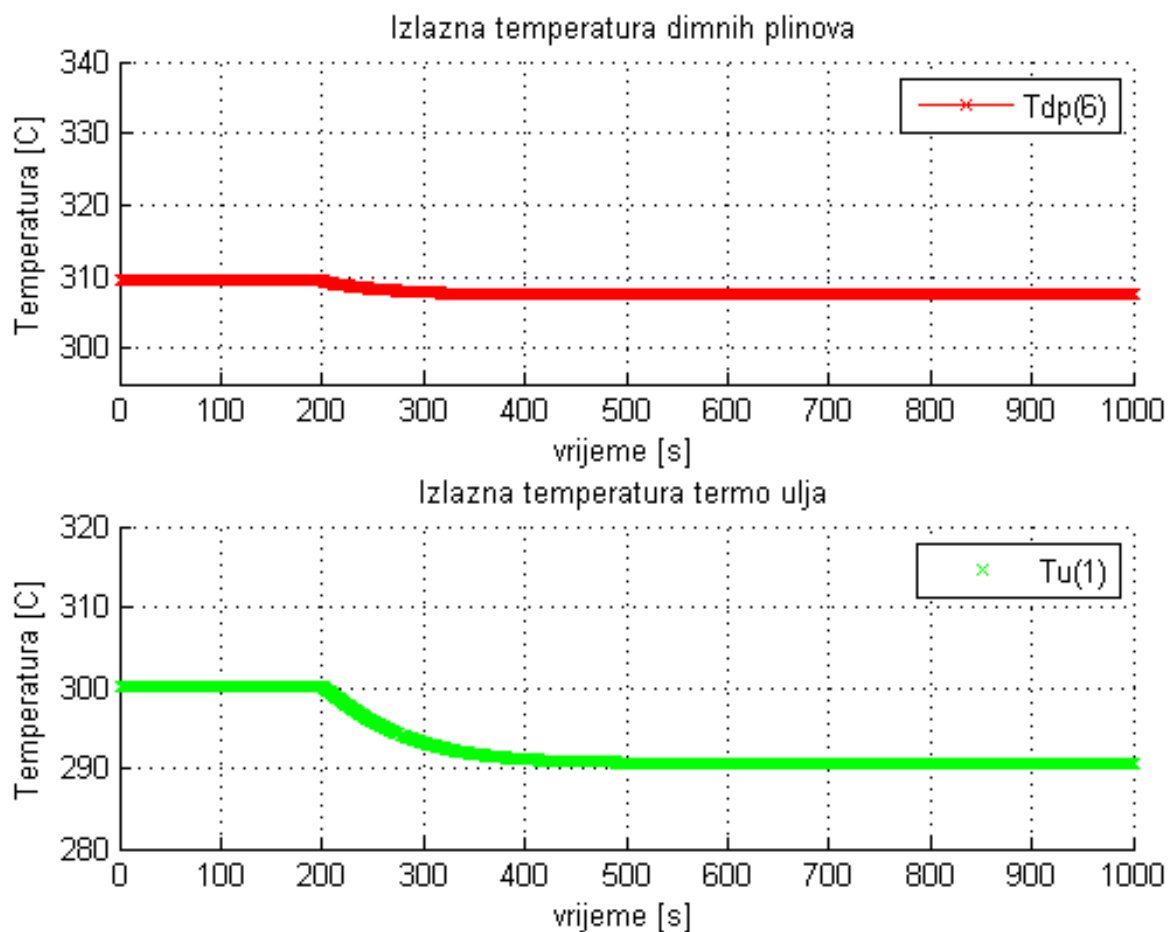
Kod povećanja ulazne temperature termo ulja za 10 °C sa 260 °C na 270 °C u 200. sekundi, također dolazi do povećanja izlaznih temperatura. Izlazna temperatura termo ulja podigla se za oko 10 °C, dok povećanje izlazne temperature dimnih plinova također iznosi 10 °C. Ulazak termo ulja sa većom temperaturom rezultira izlaskom s većom temperaturom. Izlazna temperatura dimnih plinova mora biti veća, budući da mora postojati temperaturna razlika između medija, a ograničavajući faktor prema „približavanju“ temperatura je površina.



Slika 34. Odzivi na poremećaj ulazne temperature termo ulja

### 7.4.3. Povećanje protoka termo ulja

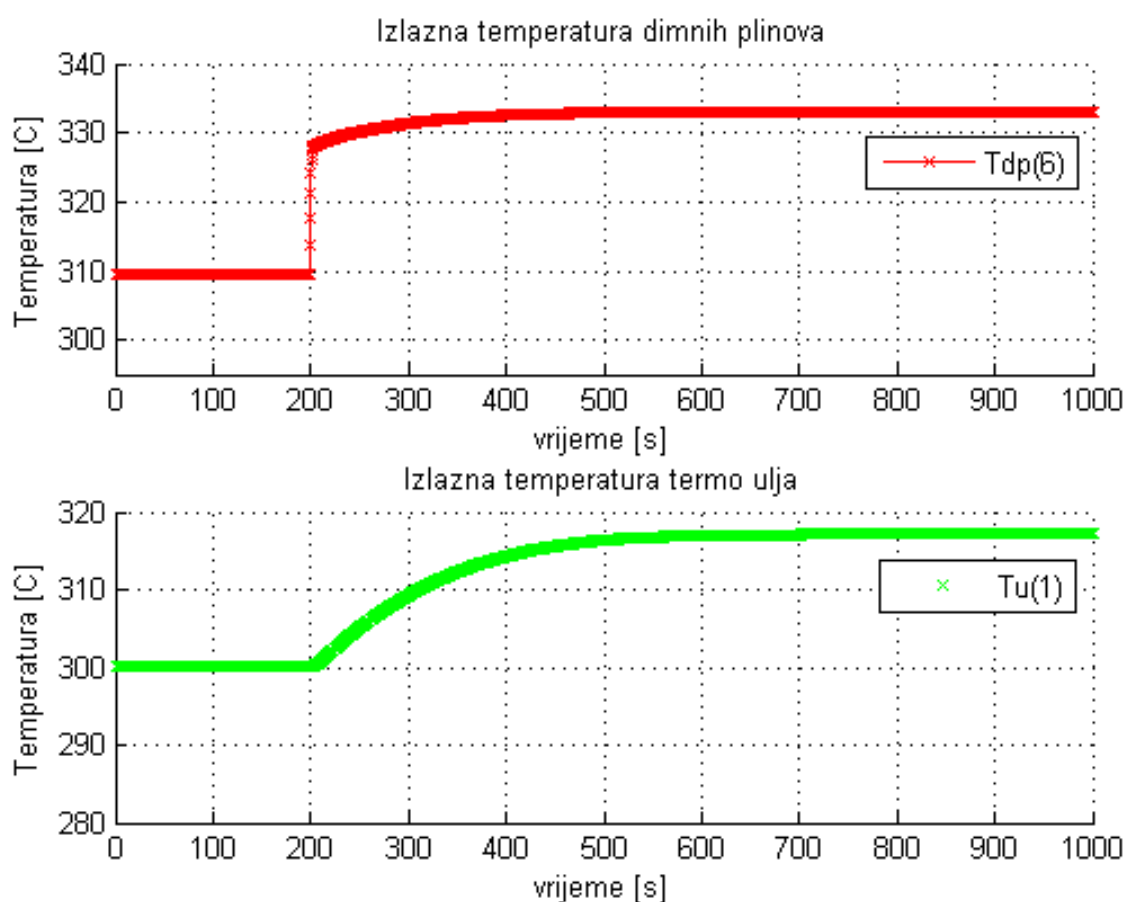
Povećanje protoka termo ulja sa 15.8 kg/s na 20.8 kg/s ima za posljedicu smanjenje izlazne temperature dimnih plinova, te također i smanjenje temperature termo ulja. Temperatura dimnih plinova malo je u padu dok j temperatura termo ulja osjetna, i iznosi oko 10 °C. Budući da se protok termo ulja poveća, izlazna temperatura termo ulja pada jer „više“ ulja se zagrije ali na manju temperaturu. Također pad izlazne temperature dimnih plinova je također logičan radi povećanje temperature razlike u izmjenjivaču.



Slika 35. Odzivi na poremećaj protoka termo ulja

#### 7.4.4. Povećanje protoka dimnih plinova

Povećanje protoka dimnih plinova sa 1.257 kg/s na 1.84 kg/s povećava izlazne temperature medija. Izlazna temperatura dimnih plinova podigla se za više od 20 °C, dok je temperatura termo ulja viša za nešto manje od 20 °C. Kako se protok dimnih plinova poveća, samim time temperatura dimnih plinova na izlazu je veća jer nose „veću“ energiju. Temperatura termo ulja logično raste.



Slika 36. Odzivi na poremećaj protoka dimnih plinova

## 8. POGON POSTROJENJA U IZVANPROJEKTNIM UVJETIMA

Nakon odabira radne tvari, izabrane konfiguiracije postrojenja, izbora kotla utilizatora s ložištem, izbora prijenosnika topline između utilizatora i ORC modula (termo ulje) proračunate su komponente postrojenja sa svim tehnološkim parametrima. Postrojenje je projektirano da može zadovoljiti toplinske potrebe od 1200 kW toplinske snage, kao i proizvodnju električne snage na generatoru od 340 kW. Budući da se toplinsko opterećenje mijenja, postavlja se pitanje kako voziti elektranu uzimajući u obzir proizvedenu električnu energiju, učinkovitost postrojenja, ...

U razmatranje ulaze dva rješenja:

- Voziti elektranu tako da se opterećenje kotla prilagođava toplinskim potrebama potrošača – a samim time postrojenje bi radilo sa višom učinkovitošću na račun smanjenja prihoda, odnosno proizvodnje električne energije
- Voziti elektranu tako da se na generatoru dobije maksimalna moguća električna snaga – dok bi se višak topline „bacao“ kroz zračni hladnjak

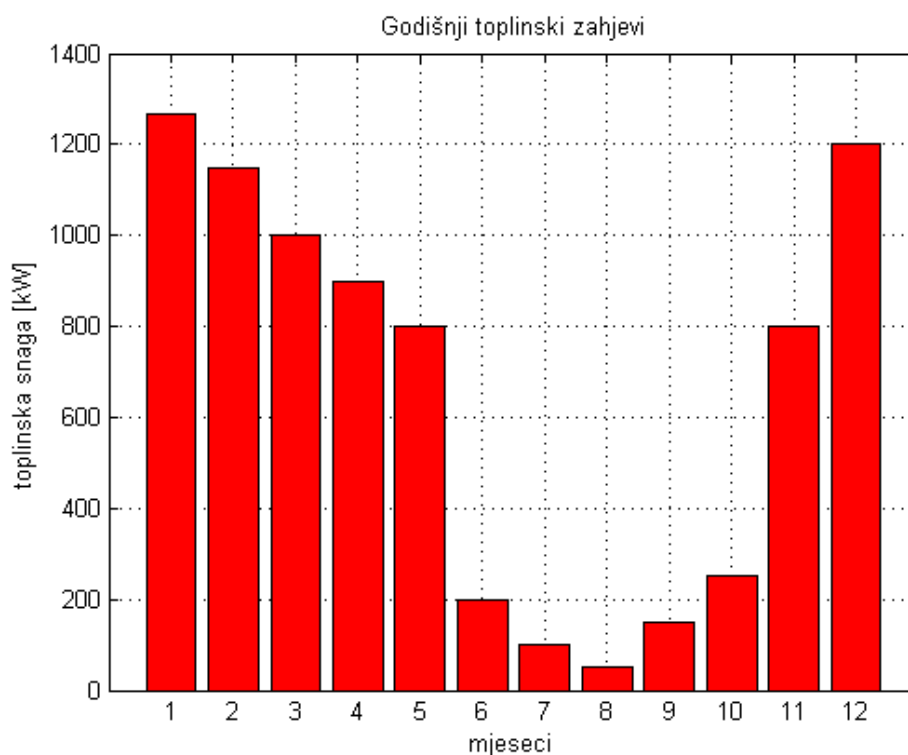
Jednadžbom pravca prema jednadžbi (89) određuje se potrošnja goriva prema predanom toplinskom toku u isparivaču. Prema jednadžbi (90) određuje se toplinski tok izmjenjen u ekonomajzeru.

$$B = 198,68 + 0,468 * (Q_{uti} - 265,55) \quad (89)$$

$$Q_{eco} = 46,48 + 0,1 * (Q_{uti} - 265,55) \quad (90)$$

## Godišnje toplinske potrebe

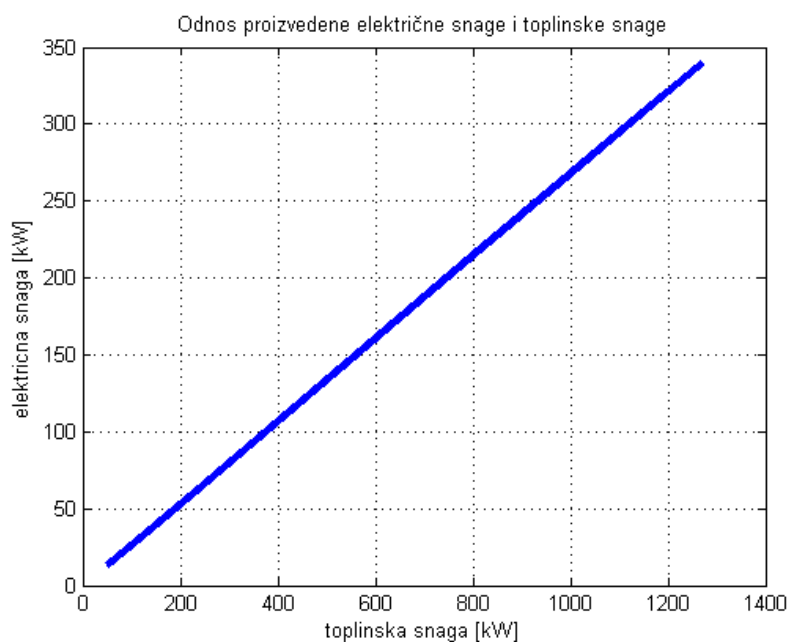
Budući da se radi o fiktivnom postrojenju, koje je nazivne toplinske snage 1200 kW, godišnje toplinske potrebe će se procijeniti na temelju sličnog postrojenja, koje toplinsku energiju koristi za grijanje prostora i sušare u drvenoj industriji. Toplinska snaga za grijanje ovisi o vanjskoj temperaturi, dok snaga za sušenje biomase ovisi direktno o postotku vlage u gorivu. Radi pojednostavljenja proračuna ukupne godišnje potrebe za toplinskom snagom su pretpostavljene. Također, pretpostavljeno je da postrojenje mjesečno radi 680 sati, što u konačnici daje 8160 radnih sati postrojenja, što je realno kod ovakvih postrojenja. Godišnje toplinske potrebe mogu se vidjeti na slici 37.



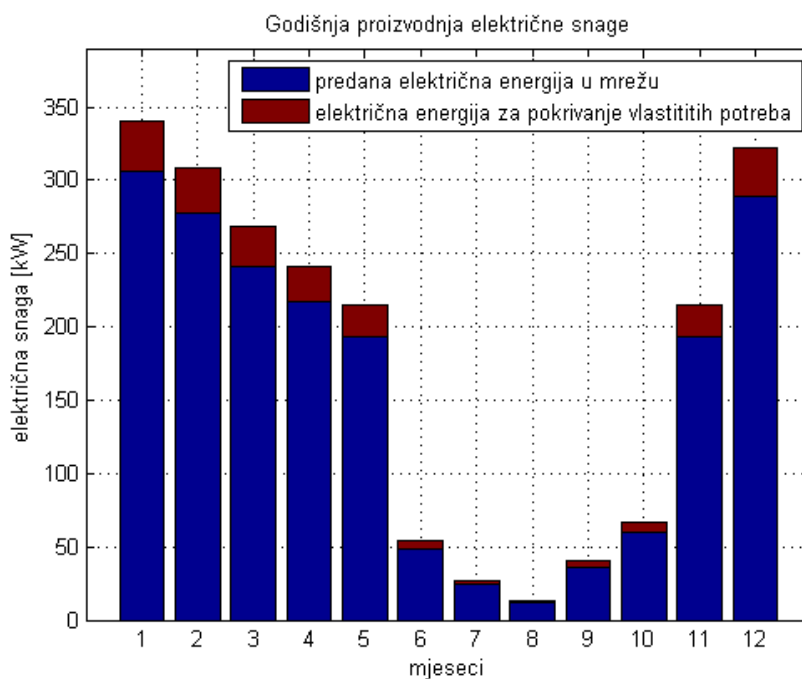
Slika 37. Godišnji toplinski zahtjevi

### 8.1. Postrojenje koje pokriva toplinske potrebe lokacije

Ovakav način rada postrojenja naziva se još i „rad bez kondenzatora“. Postrojenje ne proizvodi viškove toplinske energije, odnosno prati toplinske potrebe lokacije. Veza proizvodnje toplinske i električne energije prati zakon pravca, te se može vidjeti na slici 38.



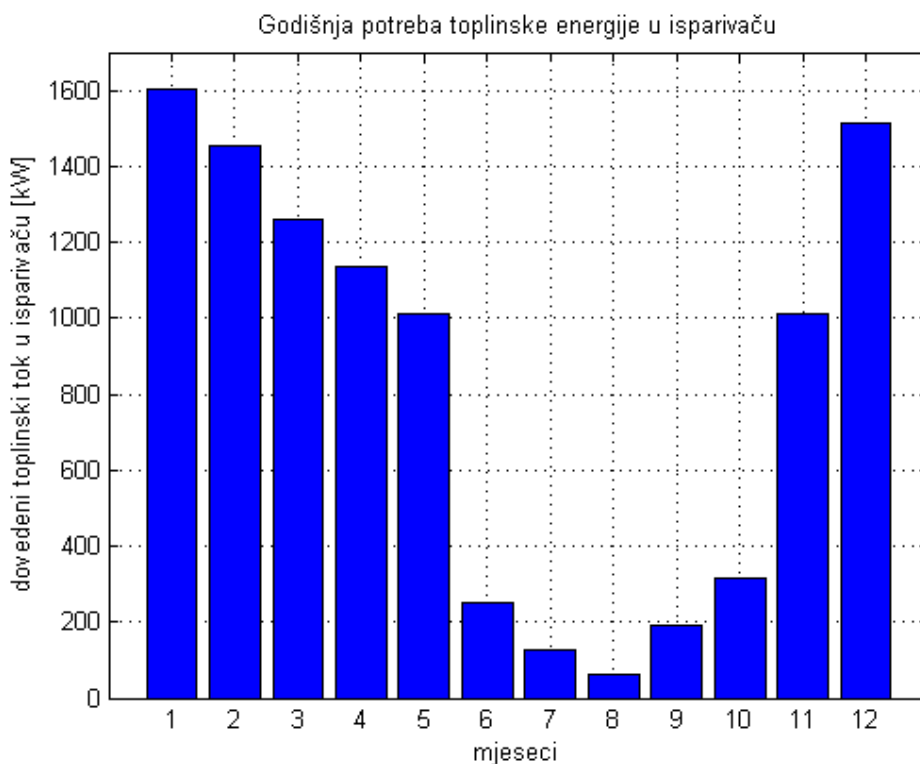
Slika 38. Linearni odnos proizvedene električne i toplinske snage



Slika 39. Godišnja proizvodnja električne snage



Postrojenje je projektirano tako da pri nazivnom opterećenju u mrežu preda 300 kW električne snage. Ostatak proizvedene snage na generatoru troši se unutar postrojenja. Procijenjena snaga koju troši postrojenje je oko 10 % proizvedene električne snage. Na slici 39. vidi se predana električna snaga u mrežu, kao i potrošena snaga u postrojenju. Da bi izračunali efikasnost postrojenja potreba nam je toplinski tok predan u isparivaču (Sl.40), da bi preko ložišta mogli odrediti potrošnju biomase.



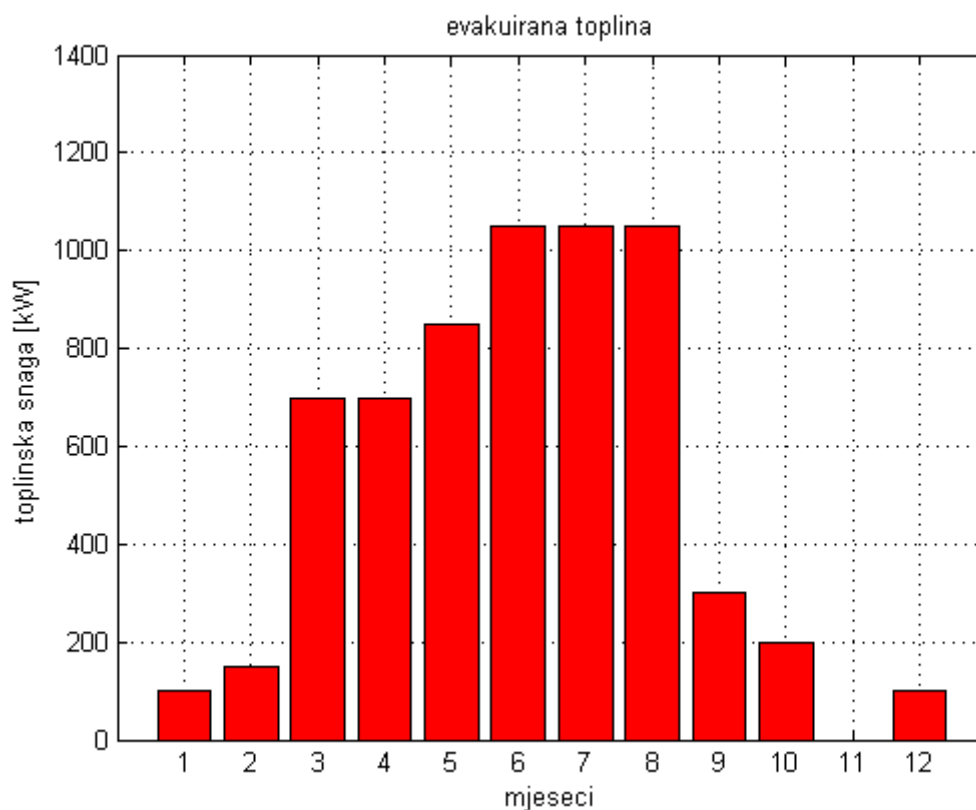
**Slika 40. Godišnja potreba toplinske energije u isparivaču**

**Tablica 19. Rezultati simulacije postrojenja bez kondenzatora**

Objašnjenje	Oznaka	Iznos
Nazivna električna snaga kogeneracije	$P_{naz}$	300 kW <sub>e</sub>
Nazivna toplinska snaga kogeneracije	$Q_{naz}$	1200 kW <sub>t</sub>
Električna energija kogeneracije	$P_{en}$	1536 MWh <sub>e</sub>
Toplinska energija kogeneracije	$Q_{en}$	5542 MWh <sub>t</sub>
Električna energija predana u mrežu	$P_{mr}$	1383 MWh <sub>e</sub>
Potrošnja drvnog ostatka	$B_{dr}$	3906 tona
Godišnja iskoristivost postrojenja	$\eta_k$	0,82

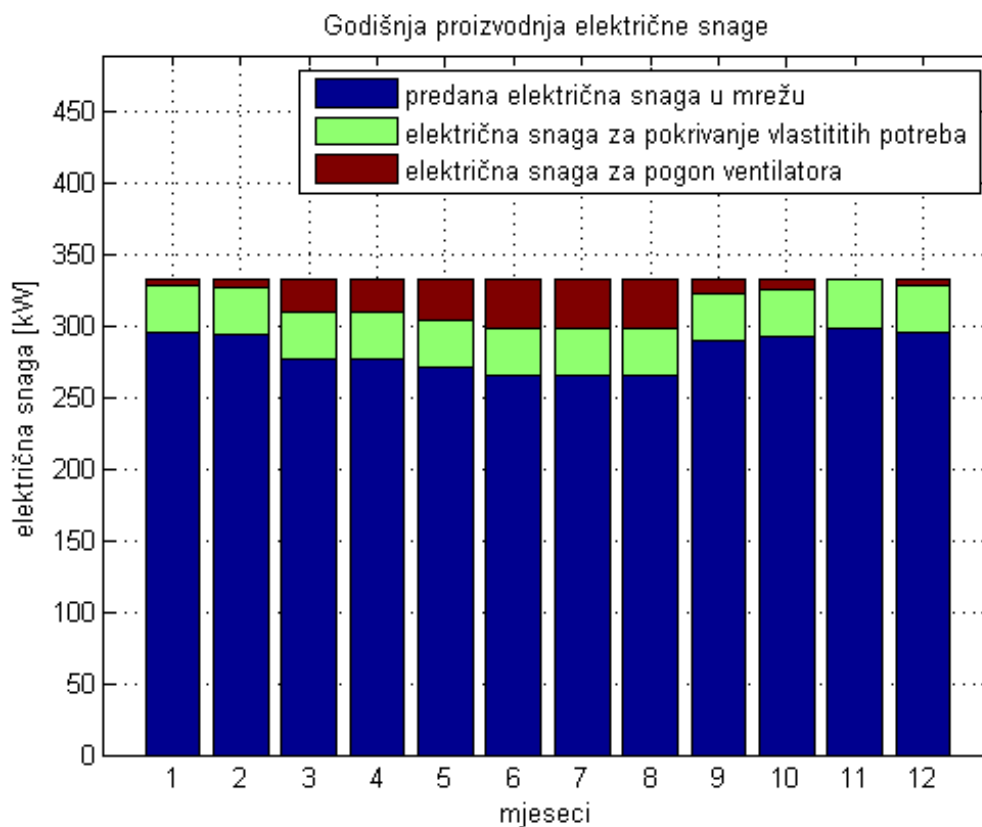
## 8.2. Postrojenje koje proizvodi viškove toplinske energije

U pravilniku o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije nije nigdje eksplicitno navedeno da proizvodnja električne energije mora biti u ritmu potražnje toplinske energije. U skladu s „rupom u zakonu“ razmotrene su alternativne konfiguracije postrojenja koje će osigurati veću proizvodnju električne energije (uz poštivanje ukupne godišnje učinkovitosti postrojenja), te povećati isplativost investicije. Alternativna konfiguracija koristi zračni hladnjak za „bacanje“ viškova toplinske energije u okolinu. Na taj način više radne tvari može kondenzirati, odnosno ispariti u isparivaču, te na taj način povećati proizvodnju električne energije. Veza potrošnja električne energije za pogon ventilatora i odvedenog toplinskog toka od rashladne vode također je procijenjena prema sličnom postrojenju koje koristi istu konfiguraciju. „Bačena“ toplinska energija može se vidjeti na slici 41.



Slika 41. Evakuirana toplinska energija

Na slici 42. vidi se koliki dio električne energije se troši na pogon ventilatora za zračni hladnjak, za pokrivanje vlastitih potreba i kolika je snaga predana u elektroenergetski sustav.



Slika 42. Godišnja proizvodnja električne energije

Tablica 20. Rezultati simulacije postrojenja sa zračnim hladnjakom

Objašnjenje	Oznaka	Iznos
Nazivna električna snaga kogeneracije	$P_{naz}$	300 kW <sub>e</sub>
Nazivna toplinska snaga kogeneracije	$Q_{naz}$	1200 kW <sub>t</sub>
Električna energija kogeneracije	$P_{en}$	2714 MWh <sub>e</sub>
Toplinska energija kogeneracije	$Q_{en}$	5542 MWh <sub>t</sub>
Električna energija predana u mrežu	$P_{mr}$	2304 MWh <sub>e</sub>
Potrošnja drvnog ostatka	$B_{dr}$	6436 tona
Godišnja iskoristivost postrojenja	$\eta_k$	0,52

Zračni hladnjak je nazivne snage 1100 kW. Iz sličnog postrojenja dobiveni su podaci da za odvod 2 MW toplinskog toka ventilatori potroše oko 65 kW električne energije. U drugoj simulaciji vidimo da je u mrežu predano više električne energije (oko 900 MWh<sub>e</sub>), ali je godišnja iskoristivost pala na 52 %, sa povećanom potrošnjom drvnog ostatka.

## 9. ZAKLJUČAK

Republika Hrvatska prati Europski strateški razvoj, te donošenjem važnih energetske odluke izravno potiče gradnju kogeneracijskih postrojenja kroz status povlaštenog proizvođača električne energije. Broj kogeneracijskih postrojenja na biomasu će u bližoj budućnosti rapidno rasti, te je za očekivati mali pad cijene otkupa električne energije predane u elektroenergetski sustav. Najvažnijih koraci u projektiranju su odabir konfiguracije postrojenja, odabir radne tvari, odabir termouljnog kotla te način vođenja energetskog sustava. Budući da se radi o malom postrojenju, odabrana je konfiguracija s regeneratorom. Regenerator je neizostavan, a može povećati električnu iskoristivost i do 10 %. Tzv. „split sustav“ se ne ugrađuje na manje sustave zbog visokih investicijskih troškova. Dizanje efikasnosti zagrijačima napojne vode iz turbine također dodatno podiže investicijske troškove te se izvodi isključivo na postojenjima veće snage. Pokazano je da pored MDM-a postoje termodinamički efikasnije radne tvari. Tržišna dostupnost, cijena i uporaba donijele su prevagu pri izboru MDM-a kao radnog medija. Kod odabira termouljnog kotla, odabire se prvo ložište, pa kotao utilizator. Odabrano je ložište snage 2100 kW, a kotao je dimenzioniran za iskorištavanje 1550 kW toplinske snage (bez ekonomajzera). Hlađenjem ložišta pri punom opterećenju odvodi se oko 160 kW toplinske snage. Hlađenjem dimnih plinova u ekonomajzeru sa 310 °C na 180 °C iskoristi se još oko 190 kW, tako da je ukupna iskoristivost ložišta i kotla pri punom opterećenju oko 90 %. Kotao utilizator projektiran je kao cijevna zmija, budući da takvi izmjenjivači imaju veliku površinu u malom prostoru i jako su česti u praksi, ne samo u ovakvim postrojenjima. Pri praćenju dinamike termohidrauličkih procesa za termouljni krug pokazano je kako je najveća opasnost od pregrijavanja termo ulja postoji pri povećanju protoka dimnih plinova, ali i kako postoje mjere sigurnosti za sprječavanje ovakvih slučajeva. Nakon izbora kotla i ORC modula postavlja se pitanje ekonomski najisplativijeg vođenja elektrane s obzirom kako postoji „rupa u zakonu“ te kogeneracija mora zadovoljiti samo godišnju iskoristivost od 50 %. Kada postrojenje prati toplinske potrebe proizvodi manje električne struje, ali sa visokom ukupnom godišnjom učinkovitošću. Kad se iz postrojenja odbacuje dio topline u okoliš, postrojenje proizvede više električne energije, ali na račun smanjenja ukupne godišnje učinkovitosti.

---

**LITERATURA**

- [1] <http://www.wvterm.si/hr/proizvodi-2/kotlovi-drvenu-sjecku/transportni-sistemi>
- [2] [http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_0030/0901b803800303db.pdf?filepath=/heattrans/pdfs/noreg/176-01407.pdf&fromPage=GetDoc](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_0030/0901b803800303db.pdf?filepath=/heattrans/pdfs/noreg/176-01407.pdf&fromPage=GetDoc)
- [3] Čehajić N., Halilčević S., Softić I. Primjena organskog Rankinovog ciklusa (ORC) i prikladni radni fluidi
- [4] Poles, S., Venturin, M.: Numerical simulation of an Organic Rankine Cycle, An ORC Scilab toolbox, Openeering, [www.openeering.com](http://www.openeering.com)
- [5] Galović, A.: Termodinamika I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [6] Lončar, D., Krajačić, G., Vujanović, M.: Podrška developerima – Primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvenu biomasu', Zagreb, 2009.
- [7] <http://www.ecolateral.org/gasificationnnfc090609.pdf>
- [8] [http://betpl.net/capacities\\_models](http://betpl.net/capacities_models)
- [9] <http://www.iastate.edu/>
- [10] <http://www.hrte.hr/>
- [11] Pravilnik o stjecanju statusa povlaštenog proizvođača električne energije (NN 133/13)
- [12] Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije (NN 33/07)
- [13] Njemačka norma, Postrojenja za prijenos topline sa organskim nositeljima topline, DIN 4754
- [14] Đuro Đaković, projektne podloge – vrelouljni kotlovi i oprema
- [15] <http://www.engineeringpage.com/technology/thermal/transfer.html>
- [16] Galović, A.: Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [17] Kreuh, L.: Generatori pare (Parni kotlovi), Školska knjiga, Zagreb, 1978.
- [18] Kharat Rahul, Nitin Bhardwaj: Development of heat transfer coefficient correlation for concentric helical coil heat exchanger, International Journal of Thermal Sciences
- [19] <http://www.turboden.eu/it/home/index.php>
- [20] D.Šljivac, M.Stojkov, K.Markanović, D.Topić, Z. Janković, E. Hnatko: Energetska učinkovitost rasplinjavanja drvne biomase u proizvodnji električne energije
- [21] Mislav Čehil, Stjepko Katulić, Toplinske tablice za kolegij „Generatori pare“
- [22] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [23] Krhen, P.: Energetsko iskorištavanje šumske biomase u Hrvatskoj, Zagreb, 2012
- [24] [http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKE\\_TRANSFORMACIJE#Tehnologije\\_izgaranja](http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKE_TRANSFORMACIJE#Tehnologije_izgaranja)

- [25] <http://www.zelenaenergija.org/clanak/kogeneracija-s-prirodnim-plinom-i-bioplinom/3810>
- [26] [http://lab.fs.uni-lj.si/opet/knjiznica/Technology\\_paper2\\_%20chp.pdf](http://lab.fs.uni-lj.si/opet/knjiznica/Technology_paper2_%20chp.pdf)

---

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Glavne komponente postrojenja
- III. Kod u MATLABU
- IV. Tehnički crteži

## OPIS RADA POSTROJENJA

U ovome poglavlju opisati će se rad postrojenja sa svojim glavnim komponentama. Funkcionalna shema postrojenja se može vidjeti na tehničkom crtežu broj 1. Gorivo se „vadi“ iz spremnika te se transportira na transportne trake sustava (1). Nakon primarnog transportnog sustava gorivo dolazi na manji, regulacijski transportni sustav (3) koji opskrbljuje dozirni uređaj (4). U većini konfiguracija prije dozirnog uređaja nalazi se manji spremnik biomase, kako bi se osigurala bolja regulacija dobave goriva u ložište. Gorivo izgara u ložištu (5) stvarajući sa kiskom vruće dimne plinove koji se pročišćavaju u komori za sekundarno izgaranje (6), te ulaze u termouljni kotao (7) i predaju većinu topline termo ulju. Ostatak topline dimnih plinova iskorištava se u dva ekonomajzera (8) i (9). Nakon izlaska iz drugog ekonomajzera (9), dimni plinovi se podvrgavaju pročišćavanju u multiciklonu (10). Venilator (11) osigurava podtlak u multiciklonu i sprječava širenje dimnih plinova po kotlovnici. Dimni plinovi izlaze u okoliš kroz dimnjak (12).

### Dnevni spremnik biomase

Izvedba i veličina spremnika biomase ovisi o snazi i konfiguraciji postrojenja. Drvni ostaci se dovoze kamionima, kontejnerima ili cisternama. Predstavljene su neke izvedbe spremnika. Dnevni spremnik biomase čini pravokutan betonski silos, koji je opremljen sa guračima za oduzimanje goriva. Pomično dno spremnika je sačinjeno od hidraulički pomicanih gurača koji gorivo potiču ili vuku prema transportnom sustavu koji odnosi gorivo u spremnik goriva prije kotla. Silos se pokriva čvrstim poklopcima po kojima se može hodati ili voziti.



Limeni silos za pelete je primjeren je za ekonomično skladištenje jer zauzima malo prostora. Isporučuje se u različitim veličinama. Pomoću integriranih sustava za ulaz i povrat zraka omogućeno je, da se silosi pune direktno iz cisterni. U silose moguća je ugradnja prozorčića za kontrolu nivoa ili se ugrade senzori za automatsko javljanje zalihe.





Alternativa stacionarnom skladištu je zamjenjivi kontejner. Kod ove varijante nastaju samo troškovi betonske ploče na koju se postavlja kontejner. Ovaj je način skladištenja drvene sječke povoljan i za dobavljače drvene sječke jer ide za kontejnere koje je lako puniti i prevoziti, a to se mora raditi i kod kamiona ili traktorskih prikolica. Svaki kontejner ima integriran klizajući pod sa hidrauličnim cilindrom preko hidrauličnog agregata. Sa hidraulikom otvara se i poklopac. Vlasnik kotlovnice mora osigurati samo potreban elektro priključak. Ako je potreba za kapacitetom skladištenja veća moguće je spojiti više kontejnera u jedan sistem i regulirati pražnjenje kontejnera kako bi se osigurao neometan duži period rada postrojenja.



## Transport goriva

Transportni sustavi za biomasu vrlo su važni za pouzdan rad sustava za spaljivanje drvene sječke. Transportni sustavi se uvijek prilagođavaju vrsti goriva i prostorijama u koje se ugrađuju kotlovi i silosi goriva. Primarni transportni sustavi dobavljaju gorivo iz spremnika do sekundarnog transportnog sustava. Za transport drvene sječke iz silosa manjeg promjera i niske visine vrlo pogodan je sustav za izvlačenje sa dijagonalnim pužem. Sustav ima kardanski zglobove i vrteći puž za oduzimanje drvene sječke iz silosa. Sustav radi, tako da sa vrtloženjem oko svoje osi i u krugu po silosu potišće biomasu u upadni kanal i preko toga u drugi transportni sustav.



Horizontalno okretni transportni sustav je masivne izrade i pogodan za pražnjenje visokih silosa ili silosa sa velikim promjerom gdje su vrlo teški uvjeti sa obzirom na težinu i vlagu drvene sječke. Sustav odlikuje robusna konstrukcija za skoro neometan rad. Kada su u pitanju izuzetno teška drvena sječka može se sustav pojačati sa jačim motorima i pogonom.



Sustav za pražnjenje sa oprugama, pogodan je za transport lake drvene sječke, piljevine ili peleta iz manjih ili srednje velikih silosa okruglog ili kvadratnog profila. Kod projektiranja sustava potrebno je poštivati ograničenja u dužini, kosini transporta, efikasnosti doziranja.



Sekundarni transportni sustav dobavlja gorivo direktno do kotlovnice. Pomoću spremnika ispred ložišta omogućava regulaciju dobave goriva u ložište. Na slici se vidi sustav koji onemogućuje rasipanje goriva po kotlovnici.



## Dozirni uređaji

Spremnici za gorivo ispred kotla služe za stvaranje zalihe drvene mase kako bi bilo omogućeno ravnomjerno doziranje bez prekida. Spremnici imaju montirane transportne puževe sa pogonima za posluživanje jednog ili više kotlova. U spremnike je montiran sustav za miješanje drvene mase kako bi se ista homogenizirala i ne bi bila stisnuta. Spremnici imaju montirane senzore za gornji i donji nivo punjenja.



Dozirni uređaj omogućava kontinuirano dovodenje goriva u ložište. Sastavljen je iz ulaznog spremnika čija visina nasipa je elektronski regulirana i dozirnog puža koji se vrti u ovisnosti potrebe u ložištu. U dozirnom uređaju se nalazi i rastresač koji rahli gorivo i sprječava zaglavljivanje. Za sprečavanje povratnog udara plamena iz ložišta kotla i gašenje gorećih ostataka je sprava opremljena sa vatrogasnim sistemom priključenog na vodu iz vodovodne mreže. Gašenje se može aktivirati na dva načina. Kod povišene temperature u cijevi dozirnog uređaja uklapa se elektromagnetski ventil koji zalije dozirni uređaj. U slučaju zatajenja elektroničkog sustava se pri temperaturi od približno 60 °C uklapa mehanički ventil i ugasi plamen. Tako je osigurano djelovanje sustava gašenje i u slučaju ispada električne energije.

## Ložište

Ložište je namjenski konstruirano za automatsko loženje goriva iz spremnika biomase. Izrađeno je iz varene kavezne konstrukcije kotlovskih cijevi, koja je hlađena vodom. Reaktor je obzidan s kvalitetnom vatrostalnom šamotnom opekom. Šamotna opeka je razreda A60 i podnosi temperaturna opterećenja i do 1600 °C. Opeka se mora hladiti da se ne bi rastalila, pogotovo u slučaju ispada potrošnje energije. Opeka je hlađena vodom i investitor mora osigurati hlađenje ložišta, odnosno osigurati potrošnju toplinske energije. Gorivo se dovodi sa pužnim transporterom u prednjem dijelu ložišta na hidrauličnu pomičnu rešetku kroz koje se dodaje primarni zrak. U ložištu se nalaze hidraulično vođene lijevane pomične rešetke, koje sadrže 24% kroma. Gorivo dolazi na rešetku u gornjem dijelu i polako putuje na niže. Brzina pomaka rešetke je kontrolirana automatikom. Na kraju pomičnih rešetki je vodom hlađeni puž za odvod pepela iz ložišta. Pepeo koji padne ispod rešetke po potrebi se očisti ručno. Ložište je opremljeno sa revizijskim otvorima i otvorima za čišćenje. Moderna konstrukcija omogućava znatno manje gubitke, visoku iskoristivost, manju potrošnju goriva i zakonski propisane emisije. Za pravilno sagorijevanje goriva se brine automatika koja neprekidno kontrolira upuhivanje primarnog i sekundarnog zraka, podtlak u ložištu, količinu doziranja goriva u ložište i brzinu pomaka rešetke te mjeri temperaturu na više mjesta u ložištu, temperaturu u kotlu i udio kisika u dimnim plinovima. Neposredno prije izlaska plamena iz ložišta, a ulaska u vertikalnu komoru za dogorijevanje upuhuje se sekundarni zrak i time se postiže potpuno izgaranje.





Prednosti ovakvog tipa ložišta su da prima gorivo do 55% vlage. Budući da se primarno izgaranje događa u podtlaku, doprinosi smanjenju dušikovih oksida.

### Vertikalna komora za dogorijevanje

Nalazi se između ložišta i termouljnog kotla. Ulaz dimnih plinova iz ložišta u komoru je pod  $90^\circ$ . Takav ulaz i kružno gibanje unutar komore sabija teške čestice prašine prema van gdje izgaraju ili padaju prema dole. Ovaj dinamičan proces sagorijevanja omogućava potpuno izgaranje dimnog pepela. Visoka turbulencija omogućava točno miješanje karbonizacijskog plina niske temperature s kisikom. Zbog toga, izgaranje može teći s niskom stopom preostalog kisika i visokom učinkovitošću tehnologije goriva. Zbog prirodnog učinka pročišćavanja vertikalno postavljene komore zone naknadnog izgaranja, izbjegava se taloženje dimnog pepela. Dodatno je izolirana, tako da su gubici svedeni na minimum. Podnosi temperaturna naprezanja i do  $1600^\circ\text{C}$  i ima dvije važne funkcije. Prva je da dolazi do potpunog izgaranja, jer se neposredno prije ulaska dimnih plinova u komoru u plamen upuhuje sekundarni zrak. Druga funkcija je pročišćavanje dimnih plinova od pepela i letećih čestica. Iz komore dimni plinovi ulaze u termouljni kotao gdje se odvija većina prijenosa topline na termo ulje.



## Termouljni kotao

Najvažniji dio zagrijača predstavljaju cilindrično savijene cijevne spirale kroz koje cirkulira termičko ulje posredstvom cirkulacione pumpe. Zagrijač je vertikalne izvedbe. Izmjenjivač se sastoji od tri savijene cijevne zmiје. Dimni plinovi su u sekundaru i struje oko cijevnog snopa. Izveden je sa tri prolaza. O kotlu i izmjenjivačkim površinama će se poslije reći više u poglavlju proračuna kotla.

## Multiciklon i dimni ventilator

Multiciklon je namijenjen mehaničkom izlučivanu praškastih čestica iz dimnih plinova i s tim ekološki prihvatljivom radom cijelog biomasnog sustava. Ohlađeni dimni plinovi se vode u mehaničku filterarsku spravu za izlučivanje krutih čestica (multiciklon), koji dolaze iz ložišta. Sprava je sastavljena iz više ćelija - ciklona, koji djeluju na principu centrifugalne i težinske snage. Dimni plinovi kod ulaza u svaki ciklon dobiju na brzini i zarotiraju. Zbog toga krute čestice centrifugalna snaga potiskuje na stjenke ciklona, po kojima zbog težine padaju na dole u konusni dio ciklona i dalje u konusni sabirni dio sprave s posudom za pepeo ili rotacijski dozator u slučaju automatskog otpeljivanja (opcija). Za duži životni vijek je konusni dio ciklona, gdje se prašina odstranjuje iz dimnih plinova, izrađen od ljevenog željeza. Čitav ciklonski otpašivač je izoliran i obložen sa obojenim limom. Dimni ventilator je smješten iza multiciklona i osigurava podtlak biomasnom sustavu. Dimni ventilator usisava zrak iz ciklonskog otpašivača, tako da brtvljenje sistema nije problem i ne dolazi do ispusta dimnih plinova u kotlovnici. Dimni ventilator je analogno reguliran uz pomoć odgovarajućeg frekventnog regulatora, tako da podtlak uvijek blizu optimalne vrijednosti.



## KOTLOVNICA

Kotlovnica je najkompleksniji i najvažniji dio postrojenja te zahtjeva posebnu pažnju kod projektiranja, kao i sigurnosnih zahtjeva. U kotlovnici se nalazi većina instalacija termo ulja. Instalacije termo ulja povezuju kotao i glavne potrošače.

Instalacije termoulja obuhvaćaju:

- sustav za cirkulaciju termo ulja (pumpe, cjevovodi, armatura) – (ljubičasta i narančasta)
- sustav za ekspanziju termo ulja (ekspanzijska posuda) sa armaturom – (zelena)
- sustav za prisilnu cirkulaciju termoulja – (tamnoplava)
- sustav za punjenje/pražnjenje termo ulja (spremnik termo ulja, armatura, cjevovodi, osiguranje s dušikom) – (žuta/zelena)
- sustav tehnoloških potrošača topline – ORC agregat i izmjenjivači topline – (5 i 9)
- hladnjak ulja za rad u nuždi (atmosferski isparivač vode) – (tamnoplava)

Razvod instalacije termoulja u kotlovnici napravljen je prema normi DIN 4754 [13].

Razvod instalacije termoulja u kotlovnici može se vidjeti na tehničkom crtežu broj 2.

### Cirkulacijske pumpe (6)

Osnovni zadatak cirkulacijske pumpe u sustavu je cirkulacija termo ulja kroz ekonomajzer, zagrijače, cjevovode i izmjenjivače potrošača. U indirektnim sustavima za zagrijavanje s termo uljem koriste se skoro isključivo jednostupanjske, centrifugalne spiralne pumpe s elektro- motornim pogonom. Cirkulacijska pumpa se montira u povratnom vodu termo ulja, budući da su u njemu temperature termo ulja niže i smanjena je opasnost od kavitacije. Zbog sigurnosti pogona u sustav termo ulja su instalirane dvije cirkulacijske pumpe (radna + rezervna) pri čemu se rezervna pumpa automatski uključuje kod ispada radne cirkulacijske pumpe. Najčešće primjenjivane standardne pumpe izrađene su od posebne vrste lijeva (NL 38, NL 42) otpornog na visoke temperature, s produženom osovinom i posebno izvedenom konstrukcijom brtvljenja, osovine koja onemogućava propuštanje termo ulja. Ležajevi osovine su udaljeni od pumpe i na poklopcima su izvedena rebra za hlađenje. Kod montaže pumpe potrebno je voditi računa da se težina cjevovoda kao i sile uzrokovane dilatacijom cjevovoda, ne prenese na pumpu više od dozvoljenog. U svrhu se mogu na usisnoj i tlačnoj strani pumpe montirati elastični kompenzatori. Pumpa za prisilno hlađenje za cirkulaciju termo ulja u slučaju nestanka strujnog napajanja, izvedena kao jednostupanjska pumpa sa spiralnim kućištem s nehladenom kliznom prstenastom brtvom. Pogon je s dizelskim motorom.

### Sigurnosni sustav termoulja

U ložištu kotla postoji velika akumulacija topline, čime u slučaju ispada cirkulacijske pumpe, nestanka električne energije ili prekida potrošnje topline dolazi do mogućnosti pregrijavanja ulja što se eliminira na slijedeći način:

- na vrhu termouljnog kotla nalazi se sigurnosni dimnjak kojim se u incidentnom slučaju ukupna količina dimnih plinova preusmjerava i izbacuje u atmosferu te dimni plinovi ne ulaze u kotao.
- u slučaju ispada tehnologije iz pogona ili naglog smanjenja kapaciteta tehnologije, čime se drastično smanjuje odvođenje topline u kotlu odnosno izmjenjivačima termo ulja, automatski se dio ulja preusmjerava u atmosferski isparivač vode u kojem se ulje kontrolirano hladi radi osiguranja od pregrijavanja. Pri tome se prilagođava i loženje. Od smanjenja do potpunog obustavljanja.

- u slučaju nestanka električne energije, dolazi do ispada loženja i svih cirkulacionih pumpi s elektro pogonom, te se automatski otvara sigurnosni dimnjak te aktivira cirkulacijska pumpa, spojena na pričuvno napajanje, koja hladi ulje preko atmosferskog isparivača vode. Zbog mogućnosti ispada sušare iz pogona pri radu s maksimalnim kapacitetom – za preuzimanje topline radi hlađenja termo ulja od strane atmosferskog isparivača – isti mora biti kapacitiran za maksimalni kapacitet kotla.

### **Ekspanzijska posuda (4)**

Uloga ekspanzijske posude u sistemu s termo uljem je prihvaćanje viška termo ulja nastalog širenjem pri zagrijavanju. Koeficijent dilatacije termo ulja iznosi prosječno  $0,00075 \text{ m}^3/\text{°C}$ . Ekspanzijska posuda sustava mora biti tako dimenzionirana da može prihvatiti 1,5 (za instalacije do tisuću litara ukupnog sadržaja), odnosno 1,3 (za instalacije preko tisuću litara ukupnog sadržaja) puta volumen ekspanzije kompletnog punjenja pri maksimalnoj radnoj temperaturi, prema [13]. Ekspanzijska posuda u otvorenim sustavima montira se minimalno jedan metar iznad najviše točke instalacije (ukupno min četiri metra) na koji se način osigurava statički tlak instalacije i onemogućava eventualna kavitacija cirkulacijske pumpe. Kod zatvorenih sustava instalacija, gdje je ekspanzijska posuda u nivou instalacije, navedeni statički tlak se osigurava dodatnim tlakom dušika.

### **Odzračna posuda (8)**

Radi potrebe efikasnog i konstantnog odzračivanja postavlja se na svim najvišim dijelovima instalacija tzv. odzračna posuda kroz koju je moguće odzračiti cjevovode i armaturu. Ispred ulaska u pumpni blok (radna i rezervna) cijela količina termo ulja prolazi pored odvojka prema ekspanziji gdje se odvajaju zrak i eventualna magla termo ulja.

### **Sabirni spremnik (drenažna posuda) (3)**

Postrojenja sa dozvoljenim volumenom punjenja većim od tisuću litara moraju biti opremljena sa jednim sabirnim spremnikom. Sabirni spremnici moraju biti tako projektirani, da mogu preuzeti minimalno volumen najvećeg dijela postrojenja koji može biti odvojen zapornim organima. Sabirni spremnici moraju biti smješteni po mogućnosti na najnižem dijelu postrojenja i moraju biti opremljeni sa pokazivačem nivoa ili mogućnošću provjere nivoa. Moraju imati uređaje za pražnjenje i odzračivanje. Kada sabirni spremnici nisu smješteni na najnižim mjestima treba predvidjeti odgovarajuće uređaje za pražnjenje dijelova postrojenja na najnižim mjestima. Sabirne spremnike treba opremiti sa uređajima za zagrijavanje ako se može očekivati skrutnjavanje nositelja topline. Kod postrojenja u kojima se nositelj topline zagrijava iznad točke isparenja kod atmosferskog tlaka treba uvijek predvidjeti sabirne spremnike. Paru koja izlazi iz uređaja za odzračivanje treba bezopasno odvesti. Prema datom slučaju to može biti pomoću kondenzatora. Kod zadnje navedenih postrojenja sa malim volumenom punjenja može zagrijač biti tako izveden da on preuzme funkciju kako ekspanzione posude tako i sabirnog spremnika. [13]

## Cjevovodi i armatura

Radi visokih temperatura termo ulja cjevovodima termo ulja treba posvetiti posebnu pažnju. Propisana je kvaliteta cijevi: za temperature do 200 °C bešavne cijevi prema HRN C.B5. 021, a za više temperature bešavne cijevi prema HRN C.B5.022. Spajanje cjevovoda vrši se zavarivanjem, osim do 50 °C gdje se mogu upotrijebiti navojni spojevi do dimenzije 5/4". Svi zavarivački radovi moraju biti izvedeni od strane stručnih i atestiranih varioca uz propisanu tehnologiju zavarivanja. Kako kod radnih temperatura termo ulja dolazi do velikih dilatacija cjevovoda, potrebno je ugradnjom kompenzatora, kompenzirati te pomake i naročito paziti na zavješanje cjevovoda. Također radi visokih temperatura obavezno je izolirati kompletnu instalaciju (osim ekspanzijske posude i tampon posude). Armature za termo ulje su vrlo važan dio postrojenja i radi posebnih zahtjeva nepropusnosti izrađuju se od kvalitetnih materijala kao: sivi lijev sa kuglastim grafitom (kvaliteta SL.20 do 300°C odnosno NL.38 – iznad 300°C) za kućišta, a nehrđajući čelik (Niro) za osovinu i pladanj. Brtvljenje kod armature, s klasičnom priteznom brtvenicom je efikasno samo do 150 °C, dok se za više temperature upotrebljava obavezno armatura brtvljenja sa čeličnim mijehom, koji je apsolutno nepropusan.

Snaga zagrijača [kW]	Nazivni otvor DN ekspanzijskih i preljevni cjevovoda	Nazivni otvor DN cjevovoda za pražnjene i odzračivanje
25	15	20
100	20	25
600	25	32
900	32	40
1200	40	50
2400	50	65
6000	65	80
12000	80	100
24000	100	150
35000	150	200



## KOD U MATLABU

### Matematički model TH

```
%=====
clear variables
close all
clc
%=====
global C1 C2 C3 C4 C5 C6 C7 Tdpu Tuu bc L rv ru r lambda_c cdp
cu cc epsilon
%=====
%=====geometrija,
konstante,=====
Ap=184.5/6; delta=0.0041; Du=0.0679; Dv=Du+2*delta;
L=Ap/(Dv*pi); rv=Dv/2;r=(Du+delta)/2;ru=Du/2;
ro_c=7850; Mc=ro_c*L*(Dv^2*pi/4-Du^2*pi/4); bc=1;
Mdp=(1.257)/(6*bc);
ro_u=768.95;
Mu=ro_u*L*Du^2*pi/4; cdp=1325; cc=662; cu=2443.9; lambda_c=59;
%=====ulazne temperature dp i
tu=====
Tuu=260;
Tdpu=1240;
%===== protok [kg/s] =====
mu0=15.8;
mdp0=1.257;
%===== alfa ovisno o protoku =====
epsilon=1;
alfadp=epsilon*32.95*(mdp0)^0.6;
alfau=550.96*(mu0/3)^0.8;
%===== koeficijenti prolaza topline =====
Kdp=(2*pi*L)/(1/(rv*alfadp)+(1/lambda_c)*log(rv/r));
Ku=2*pi*L/((1/lambda_c)*log(r/ru)+1/(ru*alfau));
%===== konstante za fsolve =====
C1=mdp0*cdp;
C2=Kdp;
C3=mu0*cu;
C4=Ku;
C5=Mdp*cdp;
C6=Mu*cu;
C7=Mc*cc;
%===== pretpostavljenje vrijednosti za rješenja fsolve
=====
x0=[1000 900 700 500 340 320 500 450 400 370 350 330 240 260
270 285 290 300];
```

```

%===== računanje temperatura (stacionarno
stanje)=====
[x]=fsolve (@myfun,x0);
%=====ispis temperatura =====
Tdp1s=x(1);
Tdp2s=x(2);
Tdp3s=x(3);
Tdp4s=x(4);
Tdp5s=x(5);
Tdp6s=x(6);
Ts1s=x(7);
Ts2s=x(8);
Ts3s=x(9);
Ts4s=x(10);
Ts5s=x(11);
Ts6s=x(12);
Tu6s=x(13);
Tu5s=x(14);
Tu4s=x(15);
Tu3s=x(16);
Tu2s=x(17);
Tu1s=x(18);
%=====rješavanje ODJ=====
%=====vektor početnih uvjeta=====
ic=[x(1),x(2),x(3),x(4),x(5),x(6),x(7),x(8),x(9),x(10),x(11),x
(12),x(13),x(14),x(15),x(16),x(17),x(18)]';
%=====vrijeme simulacije(vektor)===
tsim=(0:0.1:1000);
%=====izvršavanje simulacije=====
[t,y]=ode15s(@rjesavac,tsim,ic);
%=====ISPIS=====
figure
% % plot(t,y);hold on;grid;xlabel('vrijeme
[s]'),ylabel('Temperature po segmentima
[C]');title('Temperature medija po segmentima');
% plot(t,mp);
% subplot(311),plot(t,mp0);
subplot(211),plot(t,y(:,1:6), '-
r','Linewidth',2),grid;box;xlabel('vrijeme [s]'),
ylabel('Temperatura [C]'), legend('Tdp (1-6)'); orient tall;
title('Izlazna temperatura dimnih plinova po kontrolnim
volumenima');axis([0,1000,300,900]);
subplot(212),plot(t,y(:,13:18),'g','Linewidth',2),grid;box;xla
bel('vrijeme [s]'), ylabel('Temperatura [C]'), legend('Tu (1-
6)'); orient tall;title('Izlazna temperatura termo ulja po
kontrolnim volumenima');axis([0,1000,260,310]);
% gtext('povećanje ulaznog protoka dp u 200-oj sekundi sa 1100
na 1400 (t/h)');
function F=myfun(x)

```

```
global C1 C2 C3 C4 Tdpu Tuu
```

```
F = [C1*Tdpu-C1*x(1)-C2*(x(1)-x(7));
      C1*x(1)-C1*x(2)-C2*(x(2)-x(8));
      C1*x(2)-C1*x(3)-C2*(x(3)-x(9));
      C1*x(3)-C1*x(4)-C2*(x(4)-x(10));
      C1*x(4)-C1*x(5)-C2*(x(5)-x(11));
      C1*x(5)-C1*x(6)-C2*(x(6)-x(12));

      C2*(x(1)-x(7))-C4*(x(7)-x(18));
      C2*(x(2)-x(8))-C4*(x(8)-x(17));
      C2*(x(3)-x(9))-C4*(x(9)-x(16));
      C2*(x(4)-x(10))-C4*(x(10)-x(15));
      C2*(x(5)-x(11))-C4*(x(11)-x(14));
      C2*(x(6)-x(12))-C4*(x(12)-x(13));

      C3*Tuu-C3*x(13)+C4*(x(12)-x(13));
      C3*x(13)-C3*x(14)+C4*(x(11)-x(14));
      C3*x(14)-C3*x(15)+C4*(x(10)-x(15));
      C3*x(15)-C3*x(16)+C4*(x(9)-x(16));
      C3*x(16)-C3*x(17)+C4*(x(8)-x(17));
      C3*x(17)-C3*x(18)+C4*(x(7)-x(18))];
```

```
end
```

```
function out = rjesavac(t,in)
```

```
%=====
```

```
global C5 C6 C7 cdp cu L rv ru r lambda_c epsilon
```

```
%=====parametri ovisni o opterećenju=====
```

```
Tuu=260;
```

```
Tdpu=1240;
```

```
mu0=15.8;
```

```
mdp0=1.257;
```

```
%=====poremećaji=====
```

```
% if t>200, Tuu=270;end
```

```
% if t>200, Tdpu=1390;end
```

```
% if t>200, mu0=20.8;end
```

```
% if t>200, mdp0=1.84;end
```

```
%===== alfe o protocima=====
```

```
alfadp=epsilon*32.95*(mdp0)^0.6;
```

```
alfau=550.96*(mu0/3)^0.8;
```

```
%===== koeficijenti prolaza topline=====
```

```
Kdp=(2*pi*L)/(1/(rv*alfadp)+(1/lambda_c)*log(rv/r));
```

```
Ku=2*pi*L/((1/lambda_c)*log(r/ru)+1/(ru*alfau));
```

```
%=====vektor vrijednosti varijabli stanja=====
```

```
Tdp(1)=in(1);Tdp(2)=in(2);Tdp(3)=in(3);Tdp(4)=in(4);Tdp(5)=in(5);Tdp(6)=in(6);Ts(1)=in(7);Ts(2)=in(8);Ts(3)=in(9);Ts(4)=in(10);Ts(5)=in(11);Ts(6)=in(12);Tu(6)=in(13);Tu(5)=in(14);Tu(4)=in(15);Tu(3)=in(16);Tu(2)=in(17);Tu(1)=in(18);
```

```
%=====dimni
```

```
plinovi=====
```

```

dTdp(1)=(mdp0*cdp*Tdpu-mdp0*cdp*Tdp(1)-Kdp*(Tdp(1)-
Ts(1)))/(C5);
dTdp(2)=(mdp0*cdp*Tdp(1)-mdp0*cdp*Tdp(2)-Kdp*(Tdp(2)-
Ts(2)))/(C5);
dTdp(3)=(mdp0*cdp*Tdp(2)-mdp0*cdp*Tdp(3)-Kdp*(Tdp(3)-
Ts(3)))/(C5);
dTdp(4)=(mdp0*cdp*Tdp(3)-mdp0*cdp*Tdp(4)-Kdp*(Tdp(4)-
Ts(4)))/(C5);
dTdp(5)=(mdp0*cdp*Tdp(4)-mdp0*cdp*Tdp(5)-Kdp*(Tdp(5)-
Ts(5)))/(C5);
dTdp(6)=(mdp0*cdp*Tdp(5)-mdp0*cdp*Tdp(6)-Kdp*(Tdp(6)-
Ts(6)))/(C5);
%=====stijenka=====
dTts(1)=(Kdp*(Tdp(1)-Ts(1))-Ku*(Ts(1)-Tu(1)))/(C7);
dTts(2)=(Kdp*(Tdp(2)-Ts(2))-Ku*(Ts(2)-Tu(2)))/(C7);
dTts(3)=(Kdp*(Tdp(3)-Ts(3))-Ku*(Ts(3)-Tu(3)))/(C7);
dTts(4)=(Kdp*(Tdp(4)-Ts(4))-Ku*(Ts(4)-Tu(4)))/(C7);
dTts(5)=(Kdp*(Tdp(5)-Ts(5))-Ku*(Ts(5)-Tu(5)))/(C7);
dTts(6)=(Kdp*(Tdp(6)-Ts(6))-Ku*(Ts(6)-Tu(6)))/(C7);
%=====para=====
dTtu(6)=(mu0*cu*Tuu-mu0*cu*Tu(6)+Ku*(Ts(6)-Tu(6)))/(C6);
dTtu(5)=(mu0*cu*Tu(6)-mu0*cu*Tu(5)+Ku*(Ts(5)-Tu(5)))/(C6);
dTtu(4)=(mu0*cu*Tu(5)-mu0*cu*Tu(4)+Ku*(Ts(4)-Tu(4)))/(C6);
dTtu(3)=(mu0*cu*Tu(4)-mu0*cu*Tu(3)+Ku*(Ts(3)-Tu(3)))/(C6);
dTtu(2)=(mu0*cu*Tu(3)-mu0*cu*Tu(2)+Ku*(Ts(2)-Tu(2)))/(C6);
dTtu(1)=(mu0*cu*Tu(2)-mu0*cu*Tu(1)+Ku*(Ts(1)-Tu(1)))/(C6);
%=====vektor vrijednosti derivacija=====
out=[dTdp(1),dTdp(2),dTdp(3),dTdp(4),dTdp(5),dTdp(6),dTts(1),dT
s(2),dTts(3),dTts(4),dTts(5),dTts(6),dTtu(6),dTtu(5),dTtu(4),dTtu(3),d
Tu(2),dTtu(1)]';
end

```

## Kotao

```

%=====
close all
clear variables
clc
%=====upis iz excela (red, stupac)=====
data=xlsread('Igor_kotao.xlsx');
Hd=data(1,10);
lamdba=data(23,5);
% snaga=data(24,5);
snaga=525;
v_dp=data(44,5);
T=data(51:70,20);
Cp_ndp=data(50:70,22);
n_dp=data(43,5);
gmG=snaga/(0.99*Hd);
Qzr=data(132,5);

```

```

Cp_dp=data(50:70,21);
%=====TEORIJSKA TEMPERATURA=====
t_teorijska_pretpostavka=1343.83; %pogađanje teorijske
temperature
for i=1:20
if((t_teorijska_pretpostavka>=T(i)) &&
(t_teorijska_pretpostavka<T(i+1)))
Cp_n=Cp_ndp(i)+(Cp_ndp(i+1)-Cp_ndp(i))/(T(i+1)-
T(i))*(t_teorijska_pretpostavka-T(i));
end
end
theta_dp_teorijska=((0.99*Hd)/(v_dp*Cp_n))+20; %izrčunata
teorijska tempratura interpolcijom
%=====STVARNA
TEMPERATURA=====
t_stvarna_pretpostavka=978; % pogađanje stvarne temperature
for j=1:20
if((t_stvarna_pretpostavka>=T(j)) &&
(t_stvarna_pretpostavka<T(j+1)))
Cp_d=Cp_dp(j)+(Cp_dp(j+1)-Cp_dp(j))/(T(j+1)-
T(j))*(t_stvarna_pretpostavka-T(j));
end
end
theta_dp_stvarna=((0.99*Hd*gmG)-
Qzr/1000)/(gmG*n_dp*Cp_d))+20; % izračunata stvarna
temperatura
%=====Toplinski tok predan u
kotlu=====
Tizlaz=310;
for k=1:20
if((Tizlaz>=T(k)) && (Tizlaz<T(k+1)))
Cp_i=Cp_dp(k)+(Cp_dp(k+1)-Cp_dp(k))/(T(k+1)-
T(k))*(Tizlaz-T(k));
end
end
Cmp=((Cp_d*theta_dp_stvarna)-(Cp_i*Tizlaz))/(theta_dp_stvarna-
Tizlaz);
Qutilizator=gmG*n_dp*Cmp*(theta_dp_stvarna-Tizlaz);
%=====Toplinski tok predan
ekonomajzeru=====
Tizlaz1=180;
for z=1:20
if((Tizlaz1>=T(z)) && (Tizlaz1<T(z+1)))
Cp_s=Cp_dp(z)+(Cp_dp(z+1)-Cp_dp(z))/(T(z+1)-
T(z))*(Tizlaz1-T(z));
end
end
Cmp1=((Cp_i*Tizlaz)-(Cp_s*Tizlaz1))/(Tizlaz-Tizlaz1);
Qekonomajzer=gmG*n_dp*Cmp1*(Tizlaz-Tizlaz1);

```

```

%=====
=====
etaK=(Qutilizator+Qekonomajzer+Qzr/1000)/(snaga);
%=====
=====
B=gmG*3600;
%=====
=====
figure (1)
plot(Qutilizator,B);

figure (2)
plot(Qekonomajzer,B);

run 'Ispis_rezultata';
fprintf('Teorijska temperatura izgaranja pretpostavljena
%.2f\n',t_teorijska_pretpostavka);
fprintf('Teorijska temperatura izgaranja izračunata
%.2f\n',theta_dp_teorijska);
fprintf('Stvarna temperatura izgaranja pretpostavljena
%.2f\n',t_stvarna_pretpostavka);
fprintf('Stvarna temperatura izgaranja izračunata
%.2f\n',theta_dp_stvarna);
fprintf('Toplinski tok hlađenjem ložišta %.2f\n',Qzr/1000);
fprintf('Toplinski tok za utilizator %.2f\n',Qutilizator);
fprintf('Toplinski tok u ekonomajzeru %.2f\n',Qekonomajzer);
fprintf('Iskoristivost kotla %.2f\n',etaK);

```

## ORC s regenerатором

```

%=====
clc
clear all
clear
%=====
pi=12*10^5;      %==tlak isparavanja==%
pk=0.17*10^5;    %==tlak kondenzacije==%
%=====
run 'Turbina'
run 'Pumpa'
%=====
T7=T1+10; %pogađanje temperature T7 (regenerator)
%=====
alfaureg=550; %alfa u cijevi - regenerator
alfavreg=500; %alfa oko cijevi - regenerator
%=====
run 'Regenerator'

```

```

%=====isparivac - ulazni
podaci=====
Tu1=573.15; %ulazna temperatura termoulja
pu=9*10^5; %tlak termoulja
dv=0.058; %vanjski promjer cijevi
du=0.056; %unutarnji promjer cijevi
mu=15.46; %protok termoulja
alfauis=1100; %alfa u cijevi - isparivac
alfavis=1050; %alfa oko cijevi - isparivac
alfaupr=550; %alfa u cijevi - predgrijac
%=====
====%
run 'Isparivac'
%===== ulazni podaci kond
kondenzator=====
Tw1=343.15; %ulazna temperatura vode
mw=14.22; %protok vode
pw=1.5*10^5; %tlak vode
alfauhl=550; %alfa u cijevi - hladnjak
alfavhl=3250; %alfa oko cijevi - hladnjak
alfaukd=1000; %alfa u cijevi - kondenzator
%=====
run 'Kondenzator'
%=====linija zasićenja x=0=====
    for i=1:376
        Temp0=(188+i);
        pzas0(i)=CoolProp.PropsSI('P','T',Temp0,'Q',0,'MDM');
        Tzas(i)=CoolProp.PropsSI('T','P',pzas0(i),'Q',0,'MDM');
        Szas(i)=CoolProp.PropsSI('S','P',pzas0(i),'Q',0,'MDM');
    end
%=====linija zasićenja
x=1=====
    for j=1:376
        Temp1=(188+j);
        pzas1(j)=CoolProp.PropsSI('P','T',Temp1,'Q',1,'MDM');
        Tzas1(j)=CoolProp.PropsSI('T','P',pzas1(j),'Q',1,'MDM');
        Szas1(j)=CoolProp.PropsSI('S','P',pzas1(j),'Q',1,'MDM');
    end
%=====crtanje linije
zasićenja=====
plot(Szas/1000,Tzas,'-c',Szas1/1000,Tzas1,'-
c','LineWidth',1.5);grid on;hold on;
%=====vektori
točaka=====
tx=[s1/1000 s2/1000 s3/1000 s4/1000 s5/1000 s6/1000 s7/1000
s8/1000 su1/1000 su3/1000 sw1/1000 sw3/1000];
ty=[T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7 T8 Tu1 Tu3 Tw1 Tw3];
%=====crtanje
dijagrama=====
figure(1)

```

```

% plot(tx,ty,'*r',Ent12,Temp12,'-b',Ent23,Temp23,'-
b',Ent34,Temp34,'-b',Ent45,Temp45,'-b',Ent56,Temp56,'-
b',Ent67,Temp67,'-b',Ent78,Temp78,'-b',Ent81,Temp81,'-
b',Ent13,Temp13,'-r',Ent13w,Temp13w,'-g',Ent63,Temp63,'--
b',Ent72,Temp72,'--b','LineWidth',2);
plot(tx,ty,'*r',Ent12,Temp12,'-b',Ent23,Temp23,'-
b',Ent34,Temp34,'-b',Ent45,Temp45,'-b',Ent56,Temp56,'-
b',Ent67,Temp67,'-b',Ent78,Temp78,'-b',Ent81,Temp81,'-
b',Ent63,Temp63,'--b',Ent72,Temp72,'--b','LineWidth',2);
axis([-0.5,0.8,273,600]);
title('T,s - diagram - ORC sa regeneratorskom');
xlabel('s, [KJ/kgK]');
ylabel('Temperatura, [K]');grid on;
%=====ISPARIVAC/TERMO ULJE=====
figure(2)
ix=[Q3/1000 Q4/1000 Q5/1000];iy=[T3 T4 T5];
ux=[Q3/1000 Q4/1000 Q5/1000];uy=[Tu3 Tu2 Tu1];
plot(ix,iy,'*g',ux,uy,'*g');
plot(Qulje32,Tulje32,'-r',Qulje21,Tulje21,'--
r',Qisp34,Tisp34,'-b',Qisp45,Tisp45,'-y','LineWidth',2);
axis([500,2600,420,600]);
legend('hlađenje termo ulja u predgrijaču','hlađenje termo
ulja u isparivaču','zagrijavanje radne tvari u
predgrijaču','isparavanje radne tvari','best');
box on;
title('T,Q - diagram - ISPARIVAC - MDM/TU');
xlabel('Q, [kW]');
ylabel('Temperatura, [K]');grid on;
%=====KONDENZATOR/VODA=====
figure(3)
kx=[Q1/1000 Q8/1000 Q7/1000];ky=[T1 T8 T7];
vx=[Q1/1000 Q8/1000 Q7/1000];vy=[Tw1 Tw2 Tw3];
% plot(kx,ky,'*r',vx,vy,'*r');
plot(Qkod18,Tkod18,'-y',Qkod87,Tkod87,'--r',Qvod12,Tvod12,'-
b',Qvod23,Tvod23,'-b','LineWidth',2);
legend('kondenzacija radne tvari','hlađenje pregrijane pare
radne tvari','zagrijavanje rashladne vode');
box on;
axis([-800,700,320,400]);
title('T,Q - diagram - KONDENZATOR - MDM/VODA');
xlabel('Q, [kW]');
ylabel('Temperatura, [K]');grid on;
%=====
%=====REGENERATOR=====
figure(4)
rx=[Q7/1000 Q6/1000];ry=[T7 T6];
rex=[Q7/1000 Q6/1000];rey=[T2 T3];
plot(Qregenerator67,Tregenerator67,'-
r',Qregenerator23,Tregenerator23,'-b','LineWidth',2);
% plot(rx,ry,'*r',rex,rey,'*r');

```



```

axis([400,2000,300,550]);
box on;
legend('hlađenje pregrijane pare','zagrijavanje kondenzata');
title('T,Q - diagram - REGENERATOR');
xlabel('Q, [kW]');
ylabel('Temperatura, [K]');grid on;
%=====
etapostr=(Pt-Pp)/(Qispar/1000);
run 'Ispis_rezultata'
%=====turbina=====
etap=0.98; %eta generatora
Pt=340/etap; %snaga turbine [kW]
etaT=0.8; %eta turbine
%=====točke (3,4) u T, s=====
h5=CoolProp.PropsSI('H','P',pi,'Q',1,'MDM');
s5=CoolProp.PropsSI('S','P',pi,'H',h5,'MDM');
h6s=CoolProp.PropsSI('H','S',s5,'P',pk,'MDM');
h6=h5-etaT*(h5-h6s);
T6=CoolProp.PropsSI('T','P',pk,'H',h6,'MDM');
s6=CoolProp.PropsSI('S','P',pk,'T',T6,'MDM');
T5=CoolProp.PropsSI('T','P',pi,'H',h5,'MDM');
mrt=(Pt*1000)/(h5-h6); %protok radne tvari
%=====
Temp56=[T5 T6];
Ent56=[s5/1000 s6/1000];
%=====
etap=0.7; %eta pumpe
%=====
h1=CoolProp.PropsSI('H','P',pk,'Q',0,'MDM');
s1=CoolProp.PropsSI('S','P',pk,'H',h1,'MDM');
h2s=CoolProp.PropsSI('H','P',pi,'S',s1,'MDM');
h2=h1+((h2s-h1)/etap);
Pp=mrt*(h2-h1)/1000; %[kW]
T1=CoolProp.PropsSI('T','P',pk,'H',h1,'MDM');
T2=CoolProp.PropsSI('T','P',pi,'H',h2,'MDM');
s2=CoolProp.PropsSI('S','P',pi,'H',h2,'MDM');
%=====
Temp12=[T1 T2];
Ent12=[s1/1000 s2/1000];
h7=CoolProp.PropsSI('H','P',pk,'T',T7,'MDM');
h3=h6-h7+h2;
Qreg=mrt*(h6-h7);
s7=CoolProp.PropsSI('S','P',pk,'H',h7,'MDM');
s3=CoolProp.PropsSI('S','P',pi,'H',h3,'MDM');
T3=CoolProp.PropsSI('T','P',pi,'H',h3,'MDM');
%=====
dv=0.058; %vanjski promjer cijevi
du=0.056; %unutarnji promjer cijevi
lambda=59;

```

```

kreg=1/(dv/(du*alfaureg)+(dv/(2*lambda))*log(dv/du)+1/alfavreg);
);
deltaTmregenera=((T6-T3)-(T7-T2))/(log((T6-T3)/(T7-T2)));
Aregenera=Qreg/(kreg*deltaTmregenera);
%=====
Temp23=[T2 T3];
Ent23=[s2/1000 s3/1000];
%=====
Temp67=[T6 T7];
Ent67=[s6/1000 s7/1000];
%=====
Temp63=[T6 T3];
Ent63=[s6/1000 s3/1000];
%=====
Temp72=[T7 T2];
Ent72=[s7/1000 s2/1000];
%=====
Q6=mrt*h6;
Q2=mrt*h2;
Q7=mrt*h7;
Q3=mrt*h3;
%=====
Tregenerator67=[T7 T6];
Qregenerator67=[Q7/1000 Q6/1000];
Tregenerator23=[T2 T3];
Qregenerator23=[Q7/1000 Q6/1000];
%=====
%=====
cw=CoolProp.PropsSI('C','P',pw,'T',Tw1-10,'Water');
%spec.topl.kapacitet vode
%=====tocka (5)=====
T8=CoolProp.PropsSI('T','P',pk,'Q',1,'MDM');
s8=CoolProp.PropsSI('S','P',pk,'Q',1,'MDM');
h8=CoolProp.PropsSI('H','P',pk,'Q',1,'MDM');
%=====kondenzator=====
kkd=1/(dv/(du*alfaukd)+(dv/(2*lambda))*log(dv/du)+1/alfavhl);
Qkd=mrt*(h8-h1);
Tw2=Tw1+(Qkd/(mw*cw));
deltaTmkd=((T8-Tw2)-(T1-Tw1))/(log((T8-Tw2)/(T1-Tw1)));
Akd=Qkd/(kkd*deltaTmkd);
%=====hladnjak=====
khl=1/(dv/(du*alfauhl)+(dv/(2*lambda))*log(dv/du)+1/alfavhl);
Qhl=mrt*(h7-h8);
Tw3=Tw2+(Qhl/(mw*cw));
deltaTmhl=((T7-Tw3)-(T8-Tw2))/(log((T7-Tw3)/(T8-Tw2)));
Ahl=Qhl/(khl*deltaTmhl);
%=====površina i toplinski tok -
ukupno=====
Akond=Ahl+Akd;
Qkond=Qhl+Qkd;

```

```

%=====
=====%
Temp81=[T8 T1];
Ent81=[s8/1000 s1/1000];
Temp78=[T7 T8];
Ent78=[s7/1000 s8/1000];
sw1=CoolProp.PropsSI('S','P',pw,'T',Tw1,'Water');
sw3=CoolProp.PropsSI('S','P',pw,'T',Tw3,'Water');
Temp13w=[Tw1 Tw3];
Ent13w=[sw1/1000 sw3/1000];
%=====
=====%
Q1=mrt*h1;
Q8=mrt*h8;
Q7=mrt*h7;
%=====
=====%
Tkond18=[T1 T8];
Qkod18=[Q1/1000 Q8/1000];
Tkond87=[T8 T7];
Qkod87=[Q8/1000 Q7/1000];
%=====
=====%
Tvod12=[Tw1 Tw2];
Qvod12=[Q1/1000 Q8/1000];
Tvod23=[Tw2 Tw3];
Qvod23=[Q8/1000 Q7/1000];
%=====proracun
cu=CoolProp.PropsSI('C','P',pu,'T',Tu1,'INCOMP::DowQ');
%spec.topl.kap.termoulja
lambda=59;
%=====točka (2)=====
T4=CoolProp.PropsSI('T','P',pi,'Q',0,'MDM');
s4=CoolProp.PropsSI('S','P',pi,'Q',0,'MDM');
h4=CoolProp.PropsSI('H','P',pi,'Q',0,'MDM');
%=====proracun isparivaca=====
kis=1/(dv/(du*alfauis)+(dv/(2*lambda))*log(dv/du)+1/alfavis);
Qis=mrt*(h5-h4);
Tu2=Tu1-(Qis/(mu*cu));
deltaTmis=((Tu1-T5)-(Tu2-T4))/(log((Tu1-T5)/(Tu2-T4)));
Ais=Qis/(kis*deltaTmis);
%=====proracun
predgrijaca=====
kpr=1/(dv/(du*alfaupr)+(dv/(2*lambda))*log(dv/du)+1/alfavis);
Qpr=mrt*(h4-h3);
Tu3=Tu2-(Qpr/(mu*cu));
deltaTmpr=((Tu2-T4)-(Tu3-T3))/(log((Tu2-T4)/(Tu3-T3)));
Apr=Qpr/(kpr*deltaTmpr);
%=====površina i toplinski tok -
ukupno=====

```

```

Aisp34=Ais+Apr;
Qisp34=Qis+Qpr;
=====
=====
Temp34=[T3 T4];
Ent34=[s3/1000 s4/1000];
Temp45=[T4 T5];
Ent45=[s4/1000 s5/1000];
su1=CoolProp.PropsSI('S','P',pu,'T',Tu1,'INCOMP::DowQ');
su3=CoolProp.PropsSI('S','P',pu,'T',Tu3,'INCOMP::DowQ');
Temp13=[Tu1 Tu3];
Ent13=[su1/1000 su3/1000];
=====
=====
Q3=mrt*h3;
Q4=mrt*h4;
Q5=mrt*h5;
=====
=====
Tulje32=[Tu3 Tu2];
Qulje32=[Q3/1000 Q4/1000];
Tulje21=[Tu2 Tu1];
Qulje21=[Q4/1000 Q5/1000];
=====
=====
Tisp34=[T3 T4];
Qisp34=[Q3/1000 Q4/1000];
Tisp45=[T4 T5];
Qisp45=[Q4/1000 Q5/1000];
fprintf('Tlak isparavanja %e temperatura isparavanja
%.2f\n',pi,T4-273.15);
fprintf('Tlak kondenzacije %e temperatura kondenzacije
%.2f\n',pk,T8-273.15);
fprintf('Protok radne tvari %.2f\n',mrt);
fprintf('Snaga turbine %.2f\n',Pt);
fprintf('Snaga pumpe %.2f\n',Pp);
fprintf('Ulazna temperatura termoulja %.2f\n',Tu1-273.15);
fprintf('Izlazna temperatura termoulja %.2f\n',Tu3-273.15);
fprintf('Protok termoulja %.2f\n',mu);
fprintf('Ulazna temperatura vode %.2f\n',Tw1-273.15);
fprintf('Izlazna temperatura vode %.2f\n',Tw3-273.15);
fprintf('Protok vode %.2f\n',mw);
fprintf('Površina predgrijača %.2f toplinski tok
%.2f\n',Apr,Qpr/1000);
fprintf('Površina isparivača %.2f toplinski tok
%.2f\n',Ais,Qis/1000);
fprintf('Površina ISPARIVAČA %.2f TOPLINSKI tok
%.2f\n',Aisp34,Qisp34/1000);
fprintf('Površina hladnjaka %.2f toplinski tok
%.2f\n',Ahl,Qhl/1000);

```

```
fprintf('Površina kondenzatora %.2f toplinski tok
%.2f\n', Akd, Qkd/1000);
fprintf('Površina KONDENZATORA %.2f TOPLINSKI tok
%.2f\n', Akond, Qkond/1000);
fprintf('Eta električno %.2f\n', etapostr);
fprintf('Toplinski tok u regeneratorsu %.2f\n', Qreg/1000);
fprintf('Površina regeneratorsa %.2f\n', Aregenera);
```

## Rad postrojenja koje prati toplinske potrebe

```
%=====
clc
clear all
clear
%=====Toplinsko opterećenje po
mjesecima=====
pi=11*10^5;      %==tlak isparavanja==
pk=0.17*10^5;    %==tlak kondenzacije==
%=====Pumpa=====
etap=0.7; %eta pumpe
%=====
h1=CoolProp.PropsSI('H','P',pk,'Q',0,'MDM');
s1=CoolProp.PropsSI('S','P',pk,'H',h1,'MDM');
h2s=CoolProp.PropsSI('H','P',pi,'S',s1,'MDM');
h2=h1+((h2s-h1)/etap);
T1=CoolProp.PropsSI('T','P',pk,'H',h1,'MDM');
T2=CoolProp.PropsSI('T','P',pi,'H',h2,'MDM');
s2=CoolProp.PropsSI('S','P',pi,'H',h2,'MDM');
%=====
T8=CoolProp.PropsSI('T','P',pk,'Q',1,'MDM');
s8=CoolProp.PropsSI('S','P',pk,'Q',1,'MDM');
h8=CoolProp.PropsSI('H','P',pk,'Q',1,'MDM');
%=====
T7=T1+10;
h7=CoolProp.PropsSI('H','P',pk,'T',T7,'MDM');
%=====Toplinsko opterećenje po
mjesecima=====
Qtp=[1100 1050 500 500 350 150 150 150 900 1000 1200 1100];
t=[1:12];
Qzrac=[80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80]; %toplina predana
zračenjem
%=====kondenzator=====
===%
mrt=Qtp/(h7-h1);
etaT=0.8; %eta turbine
etap=0.98;
%=====
Pp=mrt*(h2-h1);
%=====točke (3,4) u T, s=====
h5=CoolProp.PropsSI('H','P',pi,'Q',1,'MDM');
```

```

s5=CoolProp.PropsSI('S','P',pi,'H',h5,'MDM');
h6s=CoolProp.PropsSI('H','S',s5,'P',pk,'MDM');
h6=h5-etaT*(h5-h6s);
T6=CoolProp.PropsSI('T','P',pk,'H',h6,'MDM');
s6=CoolProp.PropsSI('S','P',pk,'T',T6,'MDM');
T5=CoolProp.PropsSI('T','P',pi,'H',h5,'MDM');
%=====
Temp56=[T5 T6];
Ent56=[s5/1000 s6/1000];
%=====
Pt=mrt*(h5-h6)*etag;
Pn=0.1*Pt;
%=====
T4=CoolProp.PropsSI('T','P',pi,'Q',0,'MDM');
s4=CoolProp.PropsSI('S','P',pi,'Q',0,'MDM');
h4=CoolProp.PropsSI('H','P',pi,'Q',0,'MDM');
%=====
h3=h6-h7+h2;
s3=CoolProp.PropsSI('S','P',pi,'H',h3,'MDM');
T3=CoolProp.PropsSI('T','P',pi,'H',h3,'MDM');
%=====
Qisp=mrt*(h5-h3);
%=====
sati=[680 680 680 680 680 680 680 680 680 680 680 680 680]';
Qsnaga=(Qtp*sati)/1000; %MWht
Psnaga=(Pt*sati)/1000; %MWhe
BS=sum(sati);
% gustoca=300;
B=198.68+0.468*(Qisp-265.55); %veza potrošnje goriva i
Qisp(Quti)
Bgor=(B*sati); %kg
% Bgoriva=Bgor/gustoca;
Qeco=46.48+0.1*(Qisp-265.55);
Qeko=(Qeco*sati)/1000;
Qzr=(Qzrac*sati)/1000;
etagod=(3600*(Psnaga+Qsnaga+Qeko+Qzr))/((Bgor*9608.75)/1000);
Pmrezaa=Pt-Pn;
Pmreza=(Pmrezaa*sati)/1000;
%=====ISPISI=====
figure(1)
bar(t,Qtp,'r');
axis([0,13,0,1400]);
xlabel('mjeseci')
ylabel('toplinska snaga [kW]')
title('Godišnji toplinski zahjevi');
grid on;
%=====
figure(2)
y=[Pt(1)-Pn(1) Pn(1);Pt(2)-Pn(2) Pn(2);Pt(3)-Pn(3)
Pn(3);Pt(4)-Pn(4) Pn(4);Pt(5)-Pn(5) Pn(5);Pt(6)-Pn(6)

```

```

Pn(6);Pt(7)-Pn(7) Pn(7);Pt(8)-Pn(8) Pn(8);Pt(9)-Pn(9)
Pn(9);Pt(10)-Pn(10) Pn(10);Pt(11)-Pn(11) Pn(11);Pt(12)-Pn(12)
Pn(12)];
bar(y,'stacked');
axis([0,13,0,390]);
legend('predana električna energija u mrežu','električna
energija za pokrivanje vlastititih potreba');
xlabel('mjeseci')
ylabel('električna snaga [kW]')
title('Godišnja proizvodnja električne snage');
grid on;
%=====
figure(3)
plot(Qtp,Pt,'-b','LineWidth',3);
axis([0,1400,0,350]);
box on;
xlabel('toplinska snaga [kW]')
ylabel('elektricna snaga [kW]')
title('Odnos proizvedene električne snage i toplinske snage');
grid on;
%=====
figure(4)
bar(Qisp,'b');
axis([0,13,0,1700]);
xlabel('mjeseci')
ylabel('dovedeni toplinski tok u isparivaču [kW]')
title('Godišnja potreba toplinske energije u isparivaču');
grid on;
%=====Ispis rezultata=====
fprintf('Toplinska energija %.2f\n',Qsnaga);
fprintf('Električna energija %.2f\n',Psnaga);
fprintf('Električna energija predana u mrežu %.2f\n',Pmreza);
fprintf('Broj radnih sati %.2f\n',BS);
fprintf('Toplinska energija u ekonomajzeru %.2f\n',Qeko);
fprintf('Toplinska energija zračenjem %.2f\n',Qzr);
fprintf('Masa drvene sječke %.2f\n',Bgor/1000);
fprintf('Ukupna godišnja iskoristivost %.2f\n',etagod);

```